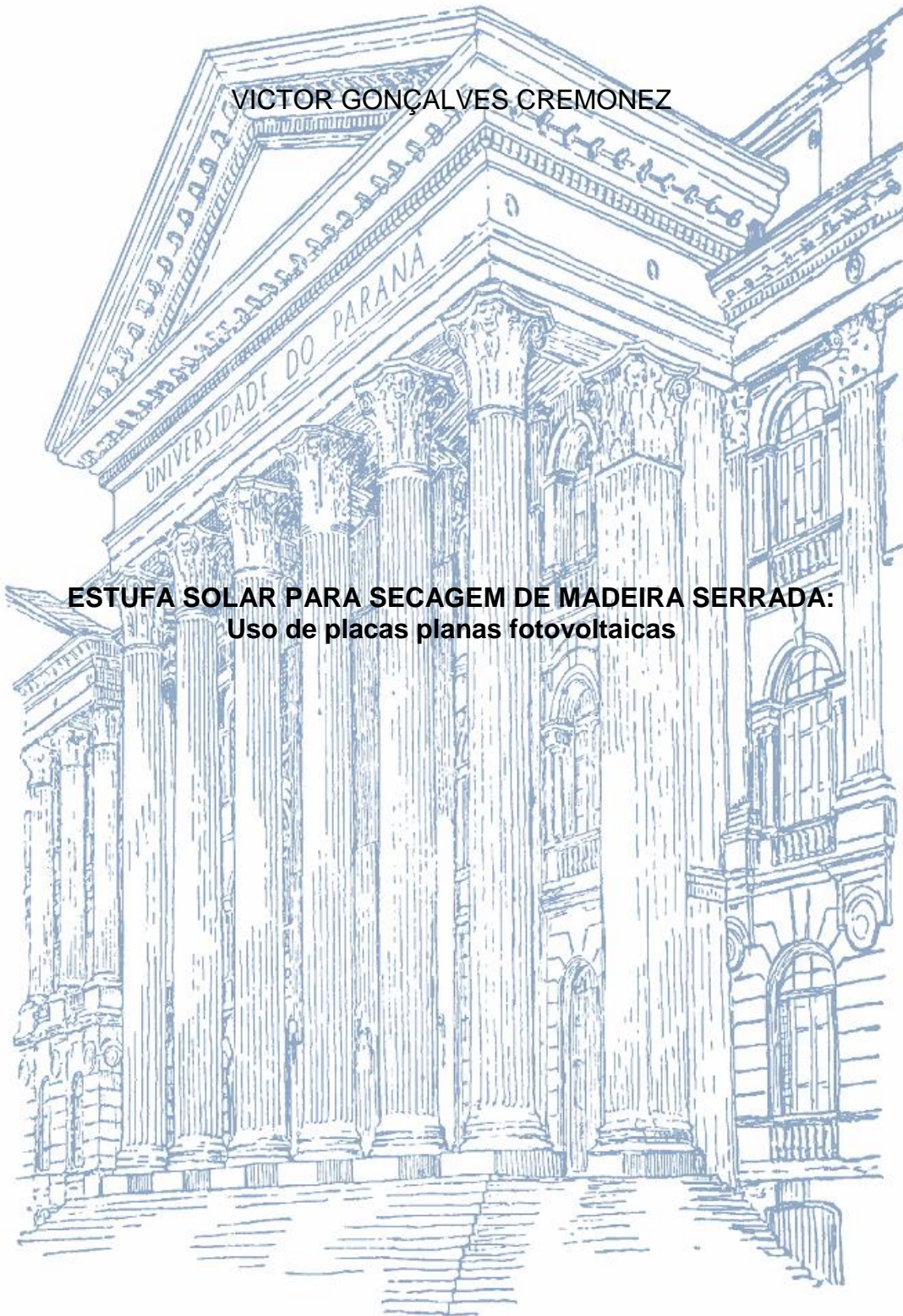


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR GONÇALVES CREMONEZ

**ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA:  
Uso de placas planas fotovoltaicas**



CURITIBA

2016

VICTOR GONÇALVES CREMONEZ

**ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA:  
Uso de placas planas fotovoltaicas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke  
Coorientador: Dr. Márcio Pereira da Rocha

CURITIBA

2016

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Cremones, Victor Gonçalves

Estufa solar para secagem de madeira serrada: uso de placas planas  
fotovoltaicas / Victor Gonçalves Cremones. – Curitiba, 2016.

109 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências  
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:  
Curitiba, 24/02/2016.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Madeira – Secagem. 2. Madeira serrada. 3. Eucalipto. 4. Teses. I. Klitzke,  
Ricardo Jorge. II. Rocha, Márcio Pereira da. III. Universidade Federal do Paraná,  
Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

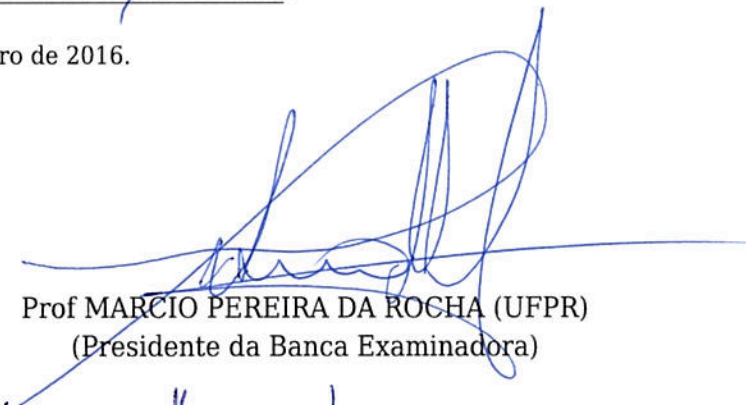
CDD – 634.9

CDU – 634.0.847

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VICTOR GONÇALVES CREMONEZ**, intitulada: **"ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA: USO DE PLACAS PLANAS FOTOVOLTAICAS"**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 24 de Fevereiro de 2016.



Prof MARCIO PEREIRA DA ROCHA (UFPR)  
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof JOSÉ TARCÍSIO LIMA (UFLA)

Prof UMBERTO KLOCK (UFPR)



Dedicado a Tereza Becker (*in memorian*),  
Hilson José Gonçalves dos Santos (*in memorian*) e Miguel Gonçalves dos Santos (*in memorian*), que mesmo não estando presentes foram importantíssimos por toda a minha vida, conquistas e também a Maricélia Gonçalves dos Santos, Edilson Eger e Franciny Paola Kolinski Pereira dos Santos, por todo amor, confiança, dedicação e carinho aplicado a mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Maricélia Gonçalves dos Santos e Edilson Eger, por todo amor, apoio, suporte, exemplo ao longo de toda minha vida e por acreditarem em mim.

Aos meus tios Eron Antônio da Silveira, Joaquin Gonçalves dos Santos Neto, Jucélia Terezinha da Silveira e aos meus primos Jonathan Patrick da Silveira e Christopher Alexander Novacoski Santos por representarem o que é família, pelas conversas, pelo carinho e todo o suporte.

A minha namorada Franciny Paola Kolinski Pereira dos Santos e toda a sua família, pelo companheirismo, amor, paciência, pelas alegrias, suporte e ajuda durante os últimos 10 anos da minha vida e formação profissional.

Aos professores, orientadores, especialmente, amigos, Ricardo Jorge Klitzke e Márcio Pereira da Rocha, pela confiança, empenho, compartilhamento de conhecimentos, momentos de paciência e por toda ajuda fornecida nesse trabalho.

A Universidade Federal do Paraná por todo o suporte e contribuição para a minha formação.

Ao curso de Pós-Graduação e a coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, por todo trabalho envolvido.

Aos colegas de laboratório Belika Yuri Mori, Cláudio Gumane Francisco Juízo, Douglas Edson Carvalho, Emanuel Sakowicz, Linéia Roberta Zen, Morgana Cristina França, Pedro Lício Loiola e Raquel Marchesan, que contribuíram muito para a realização desse trabalho e sem eles não seria possível.

Aos amigos Clériston Sidnei Martins, Emilin Joma da Silva, Erick Kuschick Karam Guerra, Guilherme Avelino Teixeira Ferreira, Gustavo Lozano Côrtes, Jéssica Aline Bueno, Lucas Carvalho Costa, Lucas Machado, Nikalay Nikalaevitch Marangoni Kumov e Renato Vissossi, pela ajuda, conselhos e apoio.

Aos professores e amigos Alan Sulato de Andrade, Dimas Agostinho Silva, Ghislaine Miranda Bonduelle, Graciela Inês Bolzón de Muniz, Ivan Venson, Jorge Luis Monteiro de Matos, José Guilherme Prata, Mayara Elita Carneiro, Silvana Nisgoski, Simone Ribeiro Morrone, Rui André Maggi dos Anjos, Nilce Nazareno da Fonte, Renato Cesar Gonçalves Robert, Rosilani Trianoski e Umberto Klock pelas

conversas, fornecimento de materiais, laboratórios e também por toda ajuda durante minha formação.

Ao marceneiro e amigo Gilberto Fernando da Silva pela ajuda em toda a parte prática e pelos momentos de risadas e alegrias, mesmo com as dificuldades.

A empresa TECPAR, em especial a Débora Colla pelo trabalho na coleta de dados das placas fotovoltaicas.

Ao SIMEPAR e INMET por fornecer os dados das variáveis ambientais externas para esse estudo.

E a todos que foram citados e aos que não o foram, mas contribuíram de alguma forma para essa pesquisa eu deixo o meu mais singelo agradecimento.

Muito Obrigado!

*“Never compromise. Not even in the face of Armageddon.”*

Watchmen (2009)



## RESUMO

A secagem da madeira é um processo essencial para se agregar valor a esse produto e o método mais utilizado para esse fim é a secagem em câmara convencional. Entretanto, essa tecnologia possui um alto custo de implementação e em energia. O emprego de técnicas que diminuam esses valores são de grande importância tanto para a indústria, quanto para pequenos produtores. Considerando o exposto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência de uma estufa solar para secagem de madeira serrada, aferindo o uso de placas fotovoltaicas planas, visando máximo rendimento da radiação solar e do equipamento. Para isso, foi construída uma estufa solar do tipo *greenhouse* com capacidade aproximada de 1m<sup>3</sup> de madeira serrada e com ventilação forçada. Com esse equipamento foram secas tábuas de *Eucalyptus* spp de 2,5 cm de espessura e comparadas com a secagem de tábuas em câmara convencional. Como análise preliminar da madeira foi avaliada a massa específica e o teor de umidade inicial, sendo antes e após o processo de secagem avaliados os parâmetros de qualidade e de secagem da madeira. Para a análise das variáveis ambientais envolvidas na estufa solar, foram utilizados dados de temperatura e umidade relativa do ar dentro e fora dela, e dados de radiação solar, calculando-se a eficiência térmica dos coletores. Paralelamente, foi realizado um estudo da eficiência de placas fotovoltaicas planas de silício policristalino e foi avaliada a viabilidade técnica desse elemento para gerar energia ao ventilador da estufa solar. O tempo de secagem solar foi quatro vezes menor que a secagem convencional. A Estufa solar mostrou-se eficiente termicamente, obtendo temperaturas próximas as ideais para secagem de eucaliptos nesse método. As variáveis ambientais demonstraram que o ponto crítico na secagem solar no dia é durante as 15 horas. As placas fotovoltaicas apresentaram viabilidade técnica para aplicação no protótipo. A secagem solar apresentou uma qualidade final melhor que a secagem convencional e um teor de umidade final similar, mostrando-se competitiva no mercado.

Palavras-chave: Estufa solar. Secagem solar. Eficiência térmica. *Eucalyptus* spp.

## ABSTRACT

The wood drying is an essential process to add value to this product and the most widespread method used for this purpose is a kiln dryer, however, there is a high cost of energy for this technology and techniques that reduce these values are of great importance for the industry and for smaller producers as well. Considering these facts, this present study aimed to evaluate the efficiency of a greenhouse for lumber drying, checking the use of flat photovoltaic panels, seeking maximum efficiency of solar radiation and of the equipment. In order to do so, a solar kiln was built with approximate capacity of 1m<sup>3</sup> and with forced ventilation. With this equipment *Eucalyptus* spp. boards with 2.5 cm thickness were dried and compared with boards dried with a standard kiln dryer. As a preliminary analysis of the wood, it was measured the specific gravity and the initial moisture content, with quality parameters of the wood drying being evaluated after and before the process. For the analysis of the environmental variables involved in solar drying it was used temperature and relative humidity inside and outside, and data of solar radiation, calculating the thermal efficiency of the collectors. In parallel, it was conducted a study of the efficiency of flat photovoltaic panels of polycrystalline silicon and it was verified the technical viability of this element to generate power to the fan of the solar drying. The solar drying time was four times less than conventional drying. The solar kiln was efficient thermally, obtaining temperatures near ideal for drying eucalyptus in this method. The environmental variables showed that the critical point in the solar drying is around 3 PM. The photovoltaics panels presented technical viability for use in the prototype. Solar drying presented a better final quality than conventional drying and a similar final moisture content, being competitive in the market.

Key-words: Solar kiln. Solar drying. Thermal efficiency. *Eucalyptus* spp.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	MOVIMENTO DA ÁGUA EM UM CAPILAR.....	24
FIGURA 2 -	CORTE TRANSVERSAL DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA COM SILÍCIO TIPO N E P.....	36
FIGURA 3 -	ESTUFA SOLAR PROJETADA; ESTUFA SOLAR CONSTRUÍDA.....	42
FIGURA 4 -	AMOSTRA PARA A REALIZAÇÃO DA SECAGEM SOLAR.....	44
FIGURA 5 -	DISPOSIÇÃO DA PILHA NA SECAGEM SOLAR.....	44
FIGURA 6 -	PLACAS FOTOVOLTAICAS PLANAS UTILIZADAS NO ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	48
FIGURA 7 -	PREPARO DAS AMOSTRAS PARA A SECAGEM CONVENCIONAL.....	50
FIGURA 8 -	LAYOUT DA ESTUFA PILOTO SEMI- INDUSTRIAL PARA A SECAGEM CONVENCIONAL.....	50
FIGURA 9 -	DISPOSIÇÃO DA PILHA PARA A SECAGEM CONVENCIONAL E DOS PINOS SENSORES.....	52
FIGURA 10 -	MÉTODO DE PREPARO DE AMOSTRAS PARA A AVALIAÇÃO DA SECAGEM; TEOR UMIDADE FINAL (A), GRADIENTE DE UMIDADE (B) E TENSÕES DE SECAGEM (C) .....	55
FIGURA 11 -	PRODEDIMENTO ADOTADO PARA CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM.....	55
FIGURA 12 -	DEMONSTRAÇÃO DA MEDIÇÃO DO ARQUEAMENTO.....	57
FIGURA 13 -	DEMONSTRAÇÃO DA MEDIÇÃO DO ENCURVAMENTO.....	57
FIGURA 14 -	DEMONSTRAÇÃO DA MEDIÇÃO DO ENCANOAMENTO.....	58
FIGURA 15 -	COLAPSO.....	58
FIGURA 16 -	CURVA DA SECAGEM SOLAR; CURVA DA SECAGEM CONVENCIONAL DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	64

FIGURA 17 - COMPORTAMENTO DIÁRIO DA TEMPERATURA NA ESTUFA SOLAR (MÉDIA, MÁXIMO E MÍNIMO) E A TEMPERATURA MÉDIA DO AMBIENTE EXTERNO NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	72
FIGURA 18 - MÉDIA DA TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR; MÉDIA UMIDADE RELATIVA DO AR INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	73
FIGURA 19 - MÉDIA DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	74
FIGURA 20 - DISPERSÃO ENTRE A TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA NA SECAGEM SOLAR COM A RADIAÇÃO SOLAR NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	76
FIGURA 21 - DISPERSÃO ENTRE A DIFERENÇA MÁXIMA DE TEMPERATURA E A RADIAÇÃO ACUMULADA NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	76
FIGURA 22 - QUANTIDADE DE ENERGIA RELATIVA INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR; QUANTIDADE DE ENERGIA EXTERNA A ESTUFA SOLAR.....	78

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp. ....	53
TABELA 2 - TEOR DE UMIDADE INICIAL; MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 12% DE UMIDADE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	60
TABELA 3 - TEMPO DE SECAGEM E TEOR DE UMIDADE FINAL PARA A SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	62
TABELA 4 - RELAÇÃO DE DEPENDÊNCIA ENTRE O TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO; EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA AS CURVAS DE SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	65
TABELA 5 - TAXA DE SECAGEM PARA A SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	65
TABELA 6 - TEMPO DE SECAGEM E TAXA DE SECAGEM EM VÁRIOS LOCAIS DO MUNDO PARA MADEIRA DE FOLHOSAS NA SECAGEM SOLAR.....	67
TABELA 7 - CONTRAÇÃO PARCIAL EM LARGURA, ESPESSURA E VOLUMÉTRICA NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	68
TABELA 8 - MÉDIAS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS INTERNAS E EXTERNAS A ESTUFA SOLAR (TEMPERATURA, UMIDADE RELATIVA DO AR E UMIDADE DE EQUILÍBRIO) NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	70
TABELA 9 - RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA; RADIAÇÃO SOLAR ACUMULADA; RADIAÇÃO SOLAR TOTAL E DIFERENÇA DE TEMPERATURA NA ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	75

TABELA 10 - EQUAÇÕES AJUSTADAS ENTRE A TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA NA SECAGEM SOLAR COM A RADIAÇÃO SOLAR E ENTRE A DIFERENÇA MÁXIMA DE TEMPERATURA E A RADIAÇÃO ACUMULADA NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	77
TABELA 11 - EQUAÇÕES POLINOMIAIS DA QUANTIDADE RELATIVA DE ENERGIA INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR.....	78
TABELA 12 - EFICIÊNCIA TÉRMICA MÉDIA DA ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	79
TABELA 13 - EFICIÊNCIA ELÉTRICA DAS PLACAS PLANAS FOTOVOLTAICAS PLANAS.....	80
TABELA 14 - TEOR DE UMIDADE FINAL; GRADIENTE DE UMIDADE; TENSÕES NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	82
TABELA 15 - ARQUEAMENTO DA MADEIRA NA SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	83
TABELA 16 - ENCURVAMENTO DA MADEIRA NA SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	84
TABELA 17 - ENCANOAMENTO DA MADEIRA NA SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	85

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	18
3.1	O GÊNERO <i>Eucalyptus</i>	18
3.2	A SECAGEM DA MADEIRA	19
3.2.1	A água contida na madeira	21
3.2.2	Movimento de água na madeira	22
3.2.3	Fatores inerentes a madeira que afetam a secagem	25
3.2.4	Fatores que afetam a secagem inerente ao ambiente	28
3.2.5	Potencial de secagem	30
3.2.6	Taxa de secagem	30
3.2.7	Defeitos de secagem	30
3.3	MÉTODOS DE SECAGEM	33
3.3.1	Estufa solar	33
3.3.2	Estufa convencional	38
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	40
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	40
4.2	MASSA ESPECÍFICA APARENTE	40
4.3	TEOR DE UMIDADE INICIAL	41
4.4	CONSTRUÇÃO ESTUFA SOLAR	41
4.5	SECAGEM SOLAR	43
4.5.1	Eficiência térmica da estufa solar	46
4.5.2	Placas fotovoltaicas planas	47
4.5.3	Dimensionamento das placas fotovoltaicas	49

4.6	SECAGEM CONVENCIONAL.....	49
4.6.1	Programa de secagem .....	53
4.6.2	Taxa de secagem.....	53
4.7	TEOR DE UMIDADE FINAL, GRADIENTE DE UMIDADE E TENSÕES DE SECAGEM.....	54
4.8	CONTRAÇÃO DA MADEIRA .....	55
4.9	INCIDÊNCIA DE DEFEITOS.....	56
4.10	ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	59
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
5.1	TEOR DE UMIDADE INICIAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 12% .....	60
5.2	TEMPO DE SECAGEM E TEOR DE UMIDADE FINAL .....	61
5.3	TAXA DE SECAGEM .....	65
5.4	CONTRAÇÃO DA MADEIRA .....	68
5.5	VARIÁVEIS AMBIENTAIS NA SECAGEM SOLAR.....	69
5.5.1	Variáveis ambientais medidas dentro e fora da estufa solar .....	69
5.5.2	Radiação solar .....	75
5.6	EFICIÊNCIA TÉRMICA DA ESTUFA SOLAR .....	79
5.7	EFICIÊNCIA DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS PLANAS.....	80
5.8	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE MADEIRA NOS DIFERENTES MÉTODOS.....	81
5.8.1	Gradiente de umidade e tensões de secagem .....	81
5.8.2	Defeitos de secagem.....	83
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>102</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Fontes alternativas de energia são cada vez mais estudadas e desenvolvidas para aplicações no presente e no futuro. Com os custos elevados, procedência finita e aspectos ambientais, a energia fóssil e a energia nuclear são consideradas não renováveis e com impactos irreversíveis para o meio ambiente. Dessa forma assume-se de crucial importância a busca por energias renováveis e não poluentes.

O aproveitamento da energia gerada pelo sol, tanto como fonte de calor quanto de luz é uma das alternativas energéticas mais promissoras para se enfrentar os desafios do futuro. Haja vista que o sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia e na escala terrestre é considerada inesgotável.

As aplicações da energia solar são divididas em dois grupos: a energia térmica (coletores planos e concentradores) que basicamente transformam a radiação diretamente em energia térmica e a energia solar fotovoltaica, processo de aproveitamento da energia solar para conversão em energia elétrica, utilizando os painéis fotovoltaicos. Entre as várias aplicações para o uso de energia, a secagem de madeira pode ser citada e é de grande importância no setor madeireiro. Também é um dos processos intermediários que mais agregam valor a madeira e com grande complexidade.

A madeira é um material renovável e complexo que apresenta um comportamento diferenciado, podendo sofrer alterações de qualidade quando exposto à secagem em condições drásticas de clima. Uma secagem apropriada pode evitar a maioria ou quase que a totalidade dos problemas com madeira serrada, minimiza os defeitos causados pela saída de água na madeira, melhora as propriedades mecânicas, estabilidade dimensional, trabalhabilidade e resistência ao ataque de organismos xilófagos. Entretanto uma grande parte da energia consumida no processamento dessa matéria-prima é consumida na secagem, o qual gera altos custos com a queima de combustíveis.

Entre os métodos usuais de secagem de madeira, a secagem convencional e a secagem ao ar livre são os mais utilizados no mundo, porém o primeiro demanda um alto investimento inicial e de manutenção, alto custo com energia, dificultando o seu uso em escalas menores, enquanto que o segundo demanda um longo período

de secagem, o teor de umidade final dificilmente alcança a umidade de equilíbrio ambiente e também não possui controle das variáveis ambientais.

Os secadores solares podem ser uma alternativa intermediária a estes dois processos, não possuindo alto custo de implementação e podendo apresentar uma boa qualidade de secagem final, num tempo reduzido comparado a secagem ao ar livre. Também podem ser aplicados em pequenas empresas e no meio rural. A secagem solar é considerada sustentável e limpa, recomendada para espécies denominadas refratárias que apresentam baixa permeabilidade e facilidade no desenvolvimento de defeitos durante a secagem.

Alguns protótipos são estudados desde a década de 50, principalmente nos Estados Unidos e Austrália, mas também difundidos em outras localidades pelo mundo, porém não são otimizados e aplicados industrialmente e em meios rurais, funcionando apenas para a pesquisa, ou como estufas rústicas, não considerando as propriedades intrínsecas da madeira, seu comportamento energético e o processo ideal de secagem. Dentro desse contexto é necessária a utilização otimizada desse equipamento e estudos de novas técnicas para melhorar esse método de secagem.

Considerando o exposto um estudo utilizando a energia solar térmica e energia solar fotovoltaica para a secagem da madeira pode ser uma boa alternativa para maximizar o uso desse tipo de energia e melhorar as condições e aplicabilidade deste tipo de equipamento.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de uma estufa solar para secagem de madeira serrada, aferindo o uso de placas fotovoltaicas planas, visando o máximo de eficiência energética e qualidade da madeira.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar o desempenho de uma estufa solar para secagem de madeira serrada, de suas variáveis ambientais e sua eficiência energética;
- b) Aferir o uso de placas fotovoltaicas planas para gerar energia elétrica ao ventilador verificando sua viabilidade técnica;
- c) Comparar a qualidade da secagem solar com a secagem convencional para a madeira de *Eucalyptus* spp.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O GÊNERO *Eucalyptus*

As espécies do gênero *Eucalyptus* pertencem à família Myrtaceae e são originárias da Austrália, Tasmânia e algumas ilhas da Oceania. São árvores de grande porte e de rápido crescimento, com ampla plasticidade e de dispersão mundial, crescem de maneira satisfatória, em grande amplitude edafoclimática e podem ser encontradas em diversas regiões do mundo (LIMA, 1996; RODERJAN, 1999).

De acordo com Waugh (1998) e Boland et al. (2006) as florestas australianas são dominadas por eucaliptos e existem mais de 900 espécies e híbridos reconhecidos e catalogados, dos quais aproximadamente 100 são utilizados em produtos de madeira. É uma árvore que se adapta bem, sendo mais sensíveis as propriedades físicas. Crescem bem nos substratos profundos e permeáveis, inclusive arenosos (RIZZINI, 1978).

A essência foi introduzida no Brasil em 1910 e tem despertado grande interesse em várias regiões do país e do mundo com o desenvolvimento de tecnologias como fertilização, manejo e processos industriais, tanto para produção de celulose que é o principal mercado, quanto para energia e mais recentemente para serraria (FRIGOTTO et al., 2015). Em 2014, a área de plantios de eucaliptos perfaz 5,56 milhões de hectares, o que representa 71,9% do total que é plantado, e estão localizados principalmente nos Estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2015).

As espécies apresentam madeira de cor variando entre amarelado até o vermelho, pouco brilho, grã de direita a revessa, textura fina a média; de macia a moderadamente dura ao corte, com cheiro e gosto distintos. A massa específica aparente varia de leve até pesada, com valores entre 0,40 a 1,20 g/cm<sup>3</sup>. Apresenta baixa durabilidade em algumas espécies até relativa alta durabilidade, mesmo sem serem preservadas (OLIVEIRA, 1999).

O gênero é excelente para serraria, mas deve-se realizar um desdobro qualificado para minimizar os efeitos das tensões de crescimento. Apresenta boas

características de aplainamento, lixamento, torneamento, furação e acabamento (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT, 1997).

*Eucaliptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus saligna* Smith estão entre as principais espécies do gênero e são plantadas em climas tropicais. A madeira de *Eucalyptus grandis* é leve e de fácil trabalhabilidade e é utilizada com grande intensidade como madeira de construção, quando proveniente de plantações de ciclo longo, na Austrália e na República Sul Africana. As tábuas produzidas em ciclos curtos são utilizadas para caixotaria. Normalmente a madeira oriunda de árvores com rápido crescimento, apresenta problemas de empenamento, contrações e rachaduras quando do desdobro (FERREIRA, 1979).

A madeira de *Eucalyptus saligna* é comumente confundida com *Eucalyptus grandis*, porém apresenta geralmente maior massa específica. Suas características a tornam indicada para: laminação, móveis, estruturas, caixotaria, postes, escoras, mourões, celulose e carvão (FERREIRA, 1979). A madeira de *Eucalyptus saligna* é fácil de ser trabalhada em operações de usinagem apresentando bom acabamento, torneamento, furação e lixamento (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT, 1989).

Um grande problema da madeira de eucalipto são as elevadas tensões de crescimento (WAUGH, 1998). Segundo OLIVEIRA (1999), essas tensões são um dos principais fatores que contribuem para a desvalorização da madeira serrada. Para completar Baena (1982), afirma que os defeitos como rachaduras e empenamentos estão associados às tensões internas que se manifestam após a derrubada das árvores, podendo ou não estar associada às tensões de secagem.

### 3.2 A Secagem da madeira

Segundo Kollmann (1959) a madeira é um material orgânico, heterogêneo, poroso, higroscópico e anisotrópico. Em função da grande complexidade desse material deve-se utilizá-lo de uma forma adequada, maximizando o seu uso.

Em qualquer processo de transformação da madeira em produtos, a secagem adequada é a fase intermediária mais importante e que mais agrega valor ao produto final (JANKOWSKY, 1995; SANTOS, 2002). Para Martins (1988) é o processo de diminuição do teor de umidade com a finalidade de levá-la a um teor

categorico, com o mínimo de defeitos no menor tempo possível e de uma forma economicamente viável para o uso final.

O processo de secagem da madeira pode ser definido como um balanço dinâmico entre a transferência de calor do fluxo de ar para a madeira, superfície de evaporação da madeira, difusão da umidade na madeira e a vazão de massa da água livre (HART, 1966). O teor de umidade inicial de uma árvore pode variar muito, algumas espécies possuem 30%, outras atingem 200% ou mais de umidade em relação a seu peso seco (RASMUSSEN, 1961; PONCE; WATAI, 1985).

À medida que a madeira perde umidade suas propriedades físicas e mecânicas sofrem alterações (MADSEN, 1992). Observa-se na madeira seca, um aumento nas suas propriedades mecânicas, isolamento térmico, elétrico e acústico, melhor trabalhabilidade em superfícies, aplicação de tintas e vernizes, favorece a colagem e a fixação de pregos e parafusos. Apresenta-se com maior estabilidade dimensional, maior proteção contra o apodrecimento causado por fungos e proteção contra alguns insetos xilófagos (KOLLMAN; CÔTÊ JUNIOR, 1968). A secagem da madeira serrada é importante, pois a saída irregular dessa umidade causará defeitos e se for mantida acima de certos valores a madeira está sujeita a ataque por fungos. Também diminui os custos de transporte, porque o peso é mais baixo (KLITZKE, 2007).

Um dos principais custos na secagem da madeira é a energia que compreende 35% do valor total do processo (WENGERT, 1977). Pode-se destacar que a secagem da madeira é responsável no processo de industrialização desse material por 70% do consumo energético requerido (MENDES, 1985). Dessa forma, uma redução nas perdas por defeitos diminui o custo do processo (STANGERLIN, 2009).

A remoção de umidade da madeira ocorre em função do gradiente de umidade desenvolvido na madeira (SIMPSON, 1991; MELLADO, 2007). Simpson (1991), Jankowsky (1995), Klitzke (2007), Mellado (2007) aludem que na secagem há três etapas em função da variação da taxa de secagem e que determinam a curva característica de secagem do material, as quais são a fase linear, parabólica e exponencial.

Em função de algumas características fisiológicas e anatômicas, o eucalipto é uma madeira que exige uma secagem mais criteriosa. Com a grande incidência de

tensões, pode possuir uma grande porcentagem de defeitos e baixo rendimento (ROCHA, 2000). Vermaas (1995) ressalta que a madeira desse gênero geralmente seca lentamente, apresentando defeitos intrínsecos como colapso, gradiente de umidade, superfícies rachadas e que associadas a pronunciadas tensões de crescimento resultam numa perda significativa de madeira.

### 3.2.1 A água contida na madeira

Os tipos de água na madeira podem ser classificados de duas formas: água capilar (água livre), que ocupa as cavidades celulares e o lúmen dos vasos, e água de impregnação (água higroscópica) encontrada nas camadas polimoleculares e nos espaços submicroscópicos da parede ligadas por forças elétricas conhecidas como ligações de hidrogênio (BROWN; PANSIN; FORSAITH, 1952; KOLLMANN, 1959; KOLLMANN; CÔTÊ JUNIOR, 1968; BRAMHALL; WELLWOOD, 1976; CECH; PFAFF, 1977; SANTINI, 1981; SIMPSON, 1984; SEVERO, 1989).

A água livre pode influenciar as propriedades térmicas e elétricas. Por outra via, a água higroscópica tem influência maior em algumas propriedades físicas, como massa específica e retratibilidade, e principalmente nas propriedades mecânicas (SIMPSON, 1991; DESCH; DINWOODIE, 1996; HAQUE, 2002; STANGERLIN, 2009).

A primeira água a ser retirada no processo de secagem é a água livre contida nas cavidades celulares, que se encontra retida por forças capilares, sendo menores do que as forças que mantêm a água de impregnação existente na parede celular (SKAAR, 1972). A saída de água capilar ocasiona apenas uma perda de massa na madeira, isto ocorre quando a madeira se encontra a teores de umidade superiores ao ponto de saturação das fibras (PSF) (KOLLMANN, 1959).

Com o início do processo de secagem a água livre sai facilmente por evaporação, até o momento em que não se contém mais este tipo de água. Neste ponto a madeira estará no que é atribuído como PSF, que corresponde a um conteúdo de umidade entre 25% e 35%, mas com a média de 28% a 32%. Nessa ocasião, as paredes estão com o máximo de conteúdo que elas podem reter, mas os

vasos e espaços intracelulares vazios (KOLLMANN, 1959; SKAAR, 1972; KLITZKE, 2007).

Nas etapas iniciais em que é removida a água livre deve-se utilizar baixas temperaturas devido aos riscos associados a remoção rápida da água a altas temperaturas. Por esse motivo curvas de secagem específicas precisam ser desenvolvidas para cada espécie de madeira e até mesmo entre a mesma espécie dependendo do uso final do produto a ser gerado (KLITZKE, 2007).

A água de impregnação dentro do intervalo de 6% a 28% é absorvida em camadas polimoleculares ligadas por forças elétricas polares (KOLLMANN, 1959). Abaixo deste teor de umidade (0 a 6%), encontra-se a água de adsorção físico-química, aderida as interfaces entre as moléculas de celulose e hemicelulose por forças de valências secundárias (Van der Waals e ligações de hidrogênio). Por esse motivo ela é mais difícil de ser retirada e necessita de mais energia e tempo de secagem (KLITZKE, 2002).

A saída da água de impregnação provoca modificações estruturais, aproximando as células lenhosas e conferindo maior rigidez as mesmas. Por esta razão, ela exerce um papel importante na utilização da madeira, e se manifesta normalmente entre o intervalo de 6 a 28% de teor de umidade (KOLLMANN, 1959).

### 3.2.2 Movimento de água na madeira

A evaporação da água livre (água absorvida) e da água de impregnação (água adsorvida) é definida como desorção. O mecanismo de movimento da umidade na estrutura celular durante a secagem é complexo e requer um estudo detalhado da física da água e da madeira (CECH; PFAFF, 1977). Existem dois movimentos de água na madeira: a capilaridade que é acima do PSF e difusão que ocorre abaixo desse ponto (SANTINI, 1981).

#### a) Capilaridade

O movimento de umidade do interior para a superfície da madeira é causado por forças capilares, acima do PSF, e segue as leis de Poiseuille (HART, 1966;



SIAU, 1984). Hart (1966); Kollmann e Côtè Junior (1968), Siau (1984), Severo (1989); Simpson (1991), Jankowsky (2009) e Loiola (2015) descrevem este tipo de movimento de uma maneira simplificada. Em um capilar cheio de um determinado líquido, o movimento é produzido pelas diferenças existentes de tensão, devido às forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão “T” em um menisco balanceado de um capilar com raio “r” pode ser calculado utilizando-se a Equação 1, não considerando as diferenças de pressão do ar existente dentro do tubo capilar.

$$T = H * \rho = \frac{2\beta}{r} \quad (1)$$

Em que:

T = tensão capilar (g/cm<sup>2</sup>)

H = altura de ascensão do líquido no capilar (cm)

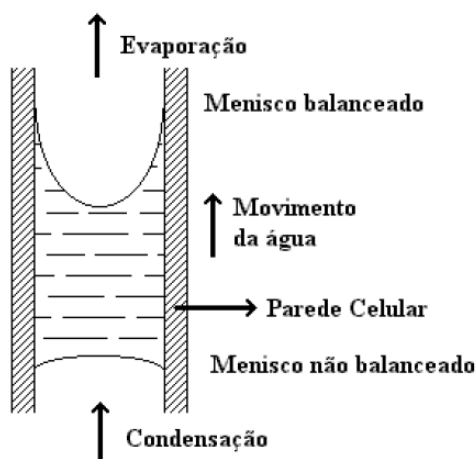
$\rho$  = densidade da água (g/cm<sup>3</sup>)

r = raio do capilar (cm)

$\beta$  = tensão superficial da água (g/cm<sup>2</sup>).

Segundo Stamm (1964) o movimento capilar (Figura 1) é beneficiado pelo aumento da temperatura, pela existência de bolhas de ar no interior das células e pelo aumento do diâmetro das pontuações. Hart (1966) menciona que a presença de bolhas de ar dentro das cavidades celulares, devido a pressão do ar mais a pressão do vapor d'água produzido pelo aquecimento, fazem com que a água movimente-se por meio das pontuações para as células adjacentes. Não obstante, se o diâmetro das bolhas de ar for menor que o raio do menisco do maior capilar do sistema, provoca uma grande redução no movimento capilar, pelo motivo de a interface ar-água desta bolha ser obrigada a deformar-se tomando uma nova forma esférica e, teoricamente o raio do menisco fica igual ao raio da pontuação. Dessa maneira, existe um aumento na tensão capilar e conseqüentemente uma pressão muito maior deve ser exercida para que o movimento do líquido se processe (SIAU, 1984; SEVERO, 1989).

FIGURA 1 – MOVIMENTO DA ÁGUA EM UM CAPILAR



FONTE: Modificado por Batista (2009) de Kollmann e Côté Junior (1968)

À medida que a água livre das cavidades celulares é progressivamente removida, outras forças de secagem começam a atuar. A força capilar age no centro da madeira e diminui gradualmente conforme o teor de umidade das células internas aproxima-se do PSF (CECH; PFAFF, 1977).

#### b) Difusão

Abaixo do PSF a água de impregnação move-se por meio das paredes celulares por um gradiente de umidade, num movimento osmótico, evapora e entre as cavidades celulares por um gradiente de pressão de vapor, torna a condensar por meio das paredes celulares, e assim consecutivamente até atingir a superfície da madeira (STAMM, 1964; HART, 1966; BRAMHAL; WELLWOOD, 1976; CECH;PFAFF, 1977).

A difusão é considerada complexa porque tanto o gradiente de umidade como o de pressão de vapor se manifestam de forma simultânea (STAMM, 1964). Como a madeira é higroscópica, as paredes celulares superiores absorvem umidade das paredes mais úmidas, procedendo um fluxo de água das células internas da madeira para as externas. Além da massa específica e permeabilidade da madeira, a temperatura também exerce considerável influência nesta difusão (HART, 1966; SANTINI, 1981).

Wassipaul (1977) relata que difusão é o fluxo molecular de massa em um sistema físico-químico sobre efeitos de um gradiente de concentração. Siau (1984), Mendes (1999) e Loiola (2015) dizem que esse fluxo pode ser representado caso ocorra em estado constante no tempo e espaço pela primeira Lei de Fick, sendo uma expressão análoga as Leis de Darcy e Fourier.

A passagem de água de impregnação por meio das paredes celulares deve-se ao salto molecular ao acaso, quando o local de origem dessa molécula for menos atraente, ou possuir maior concentração que o local do salto. Dessa forma, se uma área de alta concentração de moléculas de água (interior da madeira) e outra de baixa concentração (mais superficial) entrarem em contato, a área de mais concentração cederá vapor d'água para a de menos concentração (STAMM, 1964).

A primeira Lei de Fick não pode ser aplicada, pois o fluxo e o gradiente são variáveis em função do tempo e espaço na secagem de madeira, dessa maneira, a segunda Lei de Fick mostra-se mais coerente para o uso na difusão como pode ser visto na Equação 2 (SIAU, 1984; SEVERO, 1989; LOIOLA, 2015).

$$\frac{dU}{dt} = Dg * \frac{d^2U}{dx^2} \quad (2)$$

Em que:

$dU/dt$  = Quantidade de umidade removida (U) na unidade de tempo (t)

$Dg$  = Coeficiente de difusão médio ( $cm^2/s$ )

$d^2U/dx^2$  = Segunda derivada variação da umidade em função do espaço (%)

### 3.2.3 Fatores inerentes à madeira que afetam a secagem

#### a) Aspectos anatômicos da madeira

A madeira por ser anisotrópica apresenta uma desigualdade na perda de água nas três direções anatômicas (MENDES, 1985). A anatomia é um elemento fundamental para qualquer emprego industrial que se pretenda destinar a madeira. O comportamento mecânico desse material está intimamente associado a sua estrutura celular (COSTA, 2001).

Para Kollmann e Côtè Junior (1968) o fluxo de umidade na direção longitudinal em condições normais é de 5 a 8 vezes maior do que na direção transversal. Abaixo do PSF este valor pode aumentar sendo de 10 a 15 vezes maior. (RASMUSSEN, 1961).

A velocidade de secagem é de 20% a 50% maior no sentido radial do que no tangencial em temperaturas comuns de secagem (KOLLMANN; CÔTÈ JUNIOR, 1968). Em folhosas com grande proporção de células radiais, a difusão nesse sentido pode ser até mais do que o dobro da tangencial, mas dependendo da massa específica as células de raio contribuem apenas com 2%, tornando insignificante esse fluxo (SANTINI, 1981; SEVERO, 1989).

#### b) Massa específica da madeira

A massa específica é uma das propriedades mais importantes da madeira, pois grande parte das propriedades tecnológicas depende diretamente dela. Em geral, madeiras de maior massa específica são mais resistentes, elásticas e de maior dureza. Entretanto, são de mais difícil trabalhabilidade e apresentam maior variabilidade. O conhecimento da massa específica serve como uma informação útil sobre a sua qualidade e classificação (MORESCHI, 2014).

Há uma grande gama de valores para a massa específica da madeira variando de 0,20 g/cm<sup>3</sup> até 1,40 g/cm<sup>3</sup>. Tal alteração ocorre em função das diversas influências externas e internas que configuram a organização e dimensões das células do lenho (KOLLMANN; CÔTÈ JUNIOR, (1968); KLITZKE, 2007; LOIOLA, 2015).

O tempo de secagem normalmente é diretamente proporcional a sua massa específica (TOMASELLI, 1977), sendo que o tempo de evaporação da umidade superficial é diretamente proporcional a sua massa específica, no caso da difusão da umidade do interior até a superfície é proporcional ao quadrado do mesmo (HART, 1966). A massa específica aparente da madeira é a relação entre a massa e o volume da mesma peça de madeira (KLITZKE, 2007; MORESCHI, 2014).

### c) Contração da madeira

Com a adsorção ou a desorção da água higroscópica das paredes celulares, a madeira sofre alterações dimensionais, sendo que praticamente toda essa mudança ocorre entre 0% até o PSF (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A contração pode ser considerada uma propriedade muito importante, afetando e limitando diretamente o emprego da madeira onde a estabilidade dimensional seja importante (LOIOLA, 2015). Para Galvão e Jankowsky (1985) a mudança de volume é proporcional à variação de umidade e à massa específica, porém espécies que contenham quantidades consideráveis de resinas, extrativos e lignina são menos susceptíveis a essas alterações.

O fenômeno de adsorção, que causa o inchamento, ocorre pela inclusão de moléculas de água entre as micelas, nos espaços submicroscópicos, e nas regiões amorfas de celulose e hemiceluloses, separando-as, ocasionando a alteração volumétrica da madeira. Desta maneira, o fenômeno de desorção, responsável pela contração, é caracterizado pela retirada de água dessas mesmas regiões causando a redução no volume (SKAAR, 1988; GOMES et al., 2006).

### d) Espessura da madeira

A secagem é um processo que ocorre de dentro para fora, por conseguinte quanto maior for a espessura, maior será o tempo de secagem (RASMUSSEN, 1961; KLITZKE, 2007). Uma aproximação teórica sugere que o tempo, com condições de secagem iguais ou semelhantes, é uma função da espessura ao quadrado (MCMILLEN; WENGERT, 1978). Hart (1966) e Santini (1981) ratificam que considerando o fluxo de massa, o tempo necessário para uma redução no teor de umidade é diretamente proporcional à espessura da madeira e com relação à difusão do interior da peça para a superfície, o tempo de secagem é diretamente proporcional ao quadrado da espessura.

### c) Teor de umidade da madeira

Dependendo da época do ano, uma árvore recém cortada apresenta quantidades variadas de água em sua estrutura, mudando de acordo com a região e procedência florestal. A porcentagem de umidade varia muito entre as espécies e dentro da própria árvore (KLITZKE, 2007).

Teor de umidade de uma madeira é dado pela relação entre a massa úmida e a sua massa no estado completamente seco, expresso em porcentagem (MORESCHI, 2014). O tempo de secagem aumenta à medida que aumenta a diferença entre o teor de umidade inicial e o final da madeira (HART, 1966).

## 3.2.4 Fatores que afetam a secagem inerente ao ambiente

### a) Temperatura

Fisicamente o calor é a fonte de energia da qual as moléculas de água adquirem energia cinética necessária para sua evaporação da madeira (KLITZKE, 2007). Quanto maior a temperatura, maior a velocidade de secagem (CECH; PFAFF, 1977). No entanto, devem-se observar certos limites de temperatura para que não ocorra a degradação térmica da madeira (SEVERO, 1989).

Como a secagem se processa do interior para a superfície, se a temperatura for constante a taxa de evaporação diminuirá gradualmente à medida que diminui o teor de umidade da madeira e aumenta a pressão de vapor do ar. Por esta razão, para manter uma taxa de secagem constante, as moléculas de água precisam de energia adicional ou a pressão de vapor da estufa precisa ser reduzida (CECH; PFAFF, 1977). Isto é conseguido aumentando a temperatura (mais energia) ou reduzindo a umidade relativa (menor pressão de vapor).

### b) Circulação do ar

A circulação do ar aquecido dentro da pilha de madeira tem como finalidade transferir energia a superfície da madeira (JOHNSON, 1970). Com o aumento da

velocidade na circulação de ar, aumenta a velocidade de secagem, porém velocidades muito elevadas no início da secagem provocam uma rápida secagem na superfície, interferindo prejudicialmente (HILDEBRAND, 1970). O movimento do ar tem influência na taxa de transferência de calor, mesmo que este efeito diminua à medida que o teor de umidade decresça abaixo do PSF. Se a velocidade for constante, a taxa de transferência de calor de um fluxo de ar em movimento para a superfície da madeira é mais ou menos proporcional a esta diferença de temperatura (CECH; PFAFF, 1977).

O fluxo do ar no processo de secagem desempenha a transferência de calor para a superfície da madeira e transferência de massa de vapor d'água da superfície para o ar secante. A circulação do ar está diretamente relacionada ao consumo de energia elétrica demandada para realizar o funcionamento dos ventiladores, por isto foi amplamente estudado, visando à otimização para redução de custos (TOMASELLI, 1977; SALAMON; MCINTYRE 1969; WENGERT; DENIG, 1995; KLITZKE, 2002).

#### c) Umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio da madeira

A capacidade de secagem é afetada diretamente pela umidade relativa do ar e pela temperatura do mesmo, sendo que ambas as grandezas se correlacionam. A umidade relativa do ar determina a capacidade que o ambiente tem de absorver ou perder vapor de água (KLITZKE, 2007).

Com o aumento da temperatura, sem adicionar vapor d'água, a umidade relativa do ar diminui, pois aumenta a capacidade do ar em reter umidade. Entre a umidade da madeira, umidade relativa do ar e temperatura pode ser estabelecido um equilíbrio, que é de grande importância para a secagem da madeira, sendo que dessa relação pode-se controlar e regular o processo de secagem. Para que a umidade relativa do ar seja mantida constante durante a secagem, é preciso haver a troca de ar úmido do ambiente de secagem por ar fresco (HILDEBRAND, 1970; SANTINI, 1981).

A madeira é um material considerado higroscópico: quando úmida em relação ao ambiente, perde moléculas de vapor de água para a atmosfera e quando seca, pode absorver vapor d'água. Existe um momento em que a madeira deixa de perder

ou de ganhar moléculas de água, que é chamado de equilíbrio higroscópico da madeira, que pode ser definido como umidade de equilíbrio da madeira (KLITZKE, 2007).

### 3.2.5 Potencial de secagem

O potencial de secagem é a razão entre a umidade atual da madeira e a umidade de equilíbrio utilizada, sendo dessa forma, influenciado pelas condições de temperatura e umidade relativa do ar. Em uma mudança constante de umidade, quanto maior for o potencial de secagem empregado mais rapidamente a madeira secará (HILDEBRAND, 1970) . No início da secagem, a umidade de equilíbrio é mantida alta, e decrescerá à medida que a madeira perde umidade. Deste modo, a relação entre elas é conservada igualmente durante todo o processo de secagem (KLITZKE, 2002).

### 3.2.6 Taxa de secagem

A taxa de secagem é a quantidade de água evaporada, em um determinado intervalo de tempo, e também pode ser relacionada com a área de evaporação da peça de madeira. Por meio dela pode-se estimar o tempo de secagem de uma determinada espécie da condição de madeira verde, até um teor de umidade considerado a certa temperatura e umidade de equilíbrio (MUNIZ, 1993; SEVERO, 2000; KLITZKE; BATISTA, 2010).

A taxa de secagem depende tanto de fatores inerentes ao ambiente e também dos fatores intrínsecos a madeira. Segundo estudos conduzidos por Santini (1980) o aumento da temperatura reduz consideravelmente o tempo de secagem, teor de umidade de equilíbrio e consumo de energia.

### 3.2.7 Defeitos de secagem

Defeito de secagem é toda e qualquer mudança que ocorra na estrutura da madeira que dificulte seu processamento em uma fase posterior (BRANDÃO, 1989).



Os defeitos de secagem, além de diminuírem o valor de mercado do produto, geram desinteresse quanto a utilização de espécies refratárias (MARTINS, 1988).

De maneira geral tais espécies devem ser secas lentamente, não utilizando condições severas das variáveis ambientais do processo de secagem, pois podem apresentar vários defeitos como rachaduras, empenamentos, colapso, entre outros, que muitas vezes dificultam o seu uso (OLIVEIRA, 1997).

#### a) Empenamentos

Empenamento é qualquer distorção ou deformação da peça de madeira em relação aos planos originais de suas superfícies, causando curvatura nos seus eixos (GALVAO; JANKOWSKY, 1985; KLITZKE, 2007). Podem ocorrer pela diferença entre as contrações (radial, tangencial e longitudinal) na mesma peça ou tensões de crescimento. Eles podem ser agravados pela presença de grã irregular ou torcida e presença de anormalidades na madeira, como lenho juvenil e lenho de reação (SIMPSON, 1991). Pratt (1974) e Klitzke (2007) classificam o empenamento como do tipo encanoamento, arqueamento, encurvamento, encurvamento complexo e torcimento. Os empenamentos podem ser reduzidos ou evitados por meio de empilhamentos corretos, de restrição mecânica e com a vaporização na secagem (VERMAAS, 1998).

#### b) Rachaduras

As rachaduras aparecem como resultado das tensões de crescimento da madeira e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem (GALVAO; JANKOWSKY, 1985). Em outras palavras, de acordo com Santini (1992) as rachaduras são separações dos elementos constituintes da madeira no sentido longitudinal da grã.

Durante o processo de secagem podem ocorrer três tipos de rachaduras: superficiais, de topo e internas. As rachaduras superficiais e de topo ocorrem nos primeiros estágios, devido aos gradientes de umidade (DENIG et al., 2000), e as

rachaduras internas manifestam-se no final do processo, geralmente como um prolongamento das rachaduras superficiais (SANTOS, 2002).

### c) Colapso

O colapso é um dos principais problemas que afetam a indústria madeireira, principalmente no eucalipto. Além desse fator, as elevadas tensões de crescimento, que fazem com que o fendilhamento se potencialize, se faz necessário que a secagem desse gênero seja cuidadosa.

O colapso ocorre acima do PSF, por isso, acontece geralmente no início da secagem (KEEY; LANGRISH; WALKER, 2000). É uma distorção, achatamento ou esmagamento da madeira e, em casos extremos, demonstra-se como um enrugamento da madeira (SIMPSON, 1991; MELO, 1999). Ele é caracterizado por uma visível alteração das células lenhosas que, em vez de apresentarem contorno poligonal, surgem como que esmagadas (MELO, 1999).

Conforme explica Simpson (1991) o colapso pode ser causado por tensões compressivas de secagem nas partes internas das tábuas que excedem a resistência de compressão da madeira ou forcas de capilaridade nas cavidades celulares que estão completamente cheias de águas. Ocorre quando os esforços da tensão capilar excedem a resistência a compressão perpendicular à grã da parede celular (KLITZKE, 2007).

A vaporização da madeira, a 100°C e 100% de umidade relativa (vapor saturado), é utilizada para recuperação do colapso ao término da secagem. Esse tratamento pode durar de quatro a oito horas, dependendo de sua intensidade, e desde que a madeira não tenha sofrido ruptura de suas paredes celulares (HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1986). Para complementar, Cavalcante (1991) e Severo (2000) também afirmam que o tratamento com vaporização permite recuperar a madeira colapsada.

MACKAY (1971) nas espécies de *Eucalyptus regnaus* e *Ceratopetalum apetalum* relatou um aumento no coeficiente de difusão tanto no estado constante como no não constante, além de favorecer a recuperação do colapso após a secagem.

### 3.3 MÉTODOS DE SECAGEM

Os métodos de secagem conhecidos são: secagem ao ar livre, a baixa temperatura que compreende os pré-secadores e desumidificadores, secagem convencional, alta temperatura, secagem a vácuo, alta frequência, secagem por prensagem e secagem química. Entretanto os métodos mais utilizados são secagem ao ar livre e convencional (OLIVEIRA; SKAAR; WENGERT, 1982)

A secagem em estufa solar vem sendo recomendada por diversos autores (SANTINI, 1981; HAQUE, 2002; BAUER, 2003; STANGERLIN, 2009) como alternativa de substituição dos métodos que apresentam elevados custos de investimento, manutenção e consumo energético.

#### 3.3.1 Estufa solar

Secadores solares se baseiam nas propriedades de transmissão seletiva dos materiais transparentes, que permitem a passagem de ondas curtas (componente de maior radiação solar) em sua superfície e obstruem as ondas longas de baixa temperatura, refletidas pelos coletores usuais ou pelo material seco contido em seu interior (HANSON, 1963)

Segundo Troxell e Mueller (1968), os primeiros estudos a respeito do emprego de secadores solares para redução do conteúdo de umidade da madeira surgiram entre o final da década de 50 e início da década de 60. Os secadores solares podem dividir-se em dois tipos: modelos com coletor solar térmico incluído na estrutura e modelos em que o coletor se encontra no lado de fora da câmara de secagem (BAUER, 2003).

Com finalidade de maximizar o aumento da temperatura interna do secador, materiais como alumínio, aço, cobre e madeira, pintados de preto, são utilizados como coletor solar interno (SANTINI, 1981; VIEHBECK, 1999). Adicionalmente, o restante das estruturas sólidas internas devem ser pintadas de preto, em razão de que pinturas enegrecidas apresentam melhores qualidades de absorção da radiação solar (MALDONADO; PECK, 1962; CHUDNOFF; MALDONADO; GOYTÍA, 1966).

O tempo necessário para a secagem numa estufa solar, é afetado também pelas condições climáticas e localização geográfica, entretanto estudos demonstram que a secagem ao ar livre é sempre mais lenta que a em estufa (SANTINI, 1981)

Os secadores têm limitações no tamanho uma vez que a superfície disponível para captação de energia solar não aumenta na mesma proporção da capacidade volumétrica interna (HAIL; HOOKS; PLUMRIDGE, 1981)

Eles geralmente são parcialmente revestidos com paredes simples ou duplas de material transparente (vidro, vidro reforçado, com poliéster, fluoreto de polivinil, polietileno ou fluoreto de polivinil). Interiormente pode ter uma placa absorvedora enegrecida entre o teto e a pilha de madeira ou um material absorvedor contornando a lateral da pilha (MENDES, 1985)

Com relação a qualidade da madeira seca em estufa solar, os estudos realizados por Chen e Rosen (1979), Sattar (1987), Bauer (2003) demonstram uma menor incidência de defeitos na secagem em estufa solar em relação ao processo realizado ao ar livre.

Secadores solares eficientes necessitam de energia elétrica para suprir o sistema de ventilação. Se um secador for instalado em uma área remota, distante da rede de eletricidade, ou quando se deseja ter um secador solar completamente autônomo em energia para sua operação, uma solução bastante atrativa é utilizar energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos para acionar seus ventiladores (MORAES- DUZAT et al., 2002).

Vale ressaltar a diferença entre coletores térmicos e placas fotovoltaicas, o primeiro absorve a energia solar e utiliza a energia térmica, o segundo transforma a energia solar em energia elétrica.

#### a) Energia solar

Com a deflagração da crise energética em 1973, gerada pelo aumento do preço do barril de petróleo em 1250% o mundo ocidental se viu ameaçado devido a forte dependência do petróleo e seus derivados (MENDES, 1985; NIEDZIALKOSKI, 2013). A exploração intensa das reservas esgotáveis de combustíveis fósseis e os danos causados ao meio ambiente apresentam um cenário preocupante para o século XXI, e por esse motivo é de crucial importância à busca de fontes alternativas

de energias renováveis e não poluentes, como por exemplo, a solar e a eólica (NASCIMENTO, 2004; PEREIRA et al., 2006).

Segundo o CRESSES; CEPEL (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 1999) o aproveitamento da energia gerada pelo sol é uma das alternativas energéticas mais promissoras. E quando se fala em energia, deve-se lembrar que o sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do sol.

Anualmente o sol fornece para a atmosfera terrestre  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia, o que corresponde a 10 mil vezes o consumo mundial de energia neste período. A fração de irradiação solar que atinge o solo é constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. Se a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal, haverá também uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno, que na soma, se obtém a radiação global (CRESSES e CEPEL, 1999).

A radiação é uma forma de transferência de energia que não requer nem suporte intermédio, nem contato com o corpo radiante. A energia solar possui várias vantagens, pois além de inesgotável, contribui para redução na dependência da energia fóssil, pode ser produzida praticamente em qualquer lugar do globo, é mais previsível que a energia eólica, reduz a emissão de gases, manutenção reduzida e tem baixo impacto ambiental (PEREIRA, 2010).

As aplicações práticas da energia solar podem ser divididas em dois grupos: energia solar fotovoltaica, processo de aproveitamento da energia solar para conversão direta em energia elétrica, utilizando os painéis fotovoltaicos e a energia térmica (coletores planos e concentradores) relacionada basicamente aos sistemas de aquecimento de água (PEREIRA, 2010; PEREIRA JUNIOR, 2011).

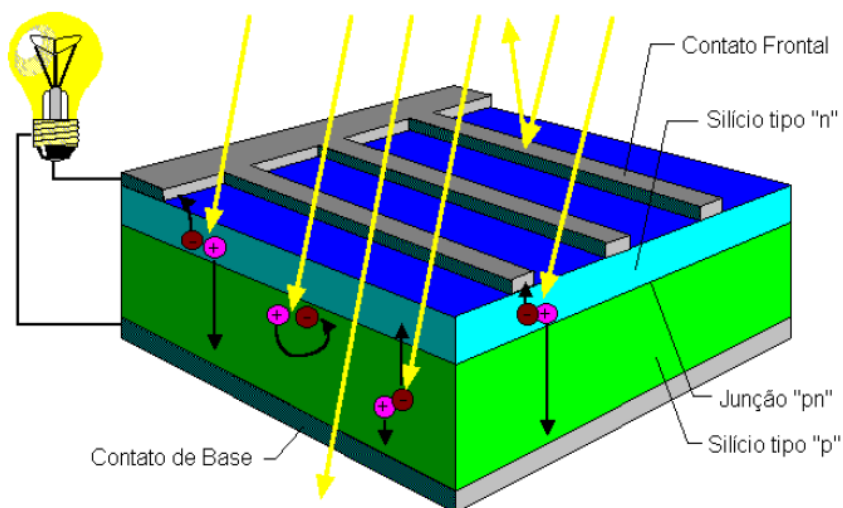
#### b) Energia fotovoltaica

O efeito fotovoltaico, descrito por Edmond Becquerel em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de um material semicondutor, produzida pela absorção da luz, sendo a célula fotovoltaica a unidade fundamental do processo de conversão. Mais tarde, em 1877, Adams e Day

desenvolveram o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição a luz, a partir do selênio. Apesar da baixa eficiência de conversão, da ordem de 0,5%, nos finais do século XIX o engenheiro alemão Werner Siemens (fundador do império industrial com o seu nome) comercializou células de selênio como fotômetros para máquinas fotográficas. Foi a primeira aplicação comercial da tecnologia (PROENÇA, 2007).

A célula fotovoltaica (Figura 2) é composta por um semicondutor, sendo que o mais usado é o silício. Seus átomos são caracterizados por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina (silício tipo N). Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo (Silício tipo P), por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, que pode ser a energia de um fóton, ou a energia solar, este elétron se livre, indo para a banda de condução criando uma diferença de potencial (ddp), gerando energia elétrica (CRESESB e CEPEL, 1999).

FIGURA 2 - CORTE TRANSVERSAL DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA COM SILÍCIO TIPO N E P



FONTE: CRESESB E CEPEL (1999)

A junção de várias células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, dão origem ao módulo fotovoltaico, que são formados por um determinado número de células conectadas em série de modo a aumentar a sua tensão (PEREIRA JUNIOR, 2011).

### c) Energia solar térmica

É a quantidade de energia que um determinado corpo é capaz de absorver, sob a forma de calor, a partir da radiação solar incidente no mesmo. A utilização dessa forma de energia implica saber captá-la e armazená-la (CRESSEB, 1999). Os equipamentos mais difundidos com o objetivo específico de se utilizar a energia solar foto-térmica são conhecidos como coletores solares.

Os coletores solares são aquecedores de fluidos (líquidos ou gasosos) e são classificados em coletores concentradores e coletores planos em função da existência ou não de dispositivos de concentração da radiação solar. O fluido aquecido é mantido em reservatórios termicamente isolados até o seu uso final (água aquecida para banho, ar quente para secagem de grãos, gases para acionamento de turbinas, etc.).

### d) Energia solar no Brasil

Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global 6,5 kWh/m<sup>2</sup> ocorre no norte do estado da Bahia, próximo a fronteira com o estado do Piauí (BANDEIRA, 2012).

A Alemanha é um dos países que consegue aplicar melhor a tecnologia fotovoltaica para gerar energia elétrica, sendo assim, é possível fazer um comparativo do potencial energético entre este país e o Brasil, dessa maneira, pode-se dizer que a área com menor potencial solar no Brasil é 4,5 kWh/m<sup>2</sup> enquanto que a Alemanha possui apenas um máximo de 1,3 kWh/m<sup>2</sup>. A conclusão que se pode ter é que o Brasil possui em todas as suas regiões potencial solar energético suficiente para geração de energia por fonte solar (FREIRE, 2013).

### 3.3.2 Estufa convencional

A secagem convencional ou artificial é o processo de secagem mais difundido no mundo e se desenvolve a temperaturas de 50°C até 100°C, sendo conduzida em ambientes, nos quais se pode controlar a temperatura, a umidade relativamente e a velocidade do ar. A capacidade das câmaras varia entre 10 m<sup>3</sup> e 150 m<sup>3</sup> e o tempo de secagem é de dias, variando com a espécie, espessura e outro fatores. Para aquecer esses sistemas se utilizam diversas fontes térmicas, sendo as mais comuns vapor de água, água quente, resistências elétricas e o óleo térmico (KLITZKE, 2007).

Além do aquecimento, esse tipo de equipamento possui um sistema de umidificação do ar, um conjunto de *dumpers* que permite a troca de ar entre o interior do secador e o meio externo e um sistema de ventilação que promove a circulação do ar entre as tabuas de madeira em secagem (JANKOWSKY, 1995).

O controle da temperatura de bulbo úmido e seco ou umidade dentro da câmara é importante durante as etapas de secagem (SIMPSON, 1991). A umidificação pode ser realizada por vaporização de água, ou como é mais comum, por injeção de vapor (MELO, 1999; BATISTA, 2009).

Apesar do vapor produzido por caldeiras seja a fonte de calor mais comum nas estufas convencionais, sistemas de aquecimento elétricos e trocadores de calor com água quente e óleo, também podem ser utilizados. A velocidade de circulação do ar pode variar entre dois e cinco m/s, e o número de ventiladores deve ser satisfatório para possibilitar uma distribuição uniforme do mesmo (HILDEBRAND, 1970; KLITZKE, 2002).

O consumo de energia em uma estufa para madeira serrada pode ser dividido em três grupos distintos: aquecimento, vaporização e circulação do ar. O aquecimento é responsável por cerca de 80% do consumo total de energia na secagem convencional. Esta energia é necessária para aquecer o ar existente dentro da estufa, aquecer a estrutura da estufa, aquecer a madeira, aquecer os separadores, evaporar a água da madeira, aquecer o ar de renovação e compensar perdas (VILLIERRE, 1966; COMSTOCK, 1975; KOCH, 1971; HATTON, 1973; SHOTTAFFER; SHULER, 1974; TOMASELLI, 1977; ROSEN, 1980; SEVERO, 1989).



O sistema de aquecimento mais utilizado é o de irradiadores tubulares alimentados por água quente ou vapor de água, a alta ou baixa pressão, proveniente de caldeiras que queimam diversos tipos de materiais combustíveis (MELO, 1999).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material utilizado nessa pesquisa foi constituído por tábuas comerciais de *Eucalyptus* spp., uma mistura entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, disponibilizadas pela empresa Mademape Madeiras, localizada no município de Campina Grande do Sul, no Paraná, com aproximadamente 15 anos de idade.

As toras são oriundas do estado do Paraná, da empresa Klabin e desdobradas na Mademape, primeiramente com uma serra fita vertical e depois por uma refiladeira, nas dimensões de 2,5x10x250 cm (espessura x largura x comprimento) perfazendo um total de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> de madeira para a secagem.

A utilização dessa madeira foi devido a boa adaptação em algumas regiões do país, plantios em larga escala e propriedades interessantes para madeira serrada. Outros fatores interessantes são a dificuldade de secagem desse gênero e alto índice de defeitos, o que traz um desafio maior do ponto de vista científico.

Foram selecionadas 93 tábuas devido ao seu aspecto fitossanitário, sendo que 63 tábuas foram usadas para secagem solar e 30 tábuas (que por sua dimensão, geram 60 amostras) somente para a convencional. O material foi enviado ao laboratório de usinagem da madeira na Universidade Federal do Paraná, para o preparo das amostras.

### 4.2 MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Os experimentos para a determinação da massa específica aparente a 12% de umidade foram obtidos conforme recomendações da COPANT – 461 (1972). Para isso, foram confeccionadas 30 repetições, tendo as amostras dimensões de 25 x 25 x 100 mm (espessura x largura x comprimento longitudinal). As amostras foram acondicionadas em uma câmara climática a  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $65 \pm 3\%$  de umidade relativa até a estabilização de todas as amostras em aproximadamente 12% de umidade. A Equação 3 demonstra como foi realizado o cálculo.

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (3)$$

Em que:

$\rho_{12\%}$  - Massa específica aparente a 12% de umidade (g/cm<sup>3</sup>);

$m_{12\%}$  - Massa da madeira a 12% de umidade (g);

$V_{12\%}$  - Volume a 12 % de umidade (cm<sup>3</sup>);

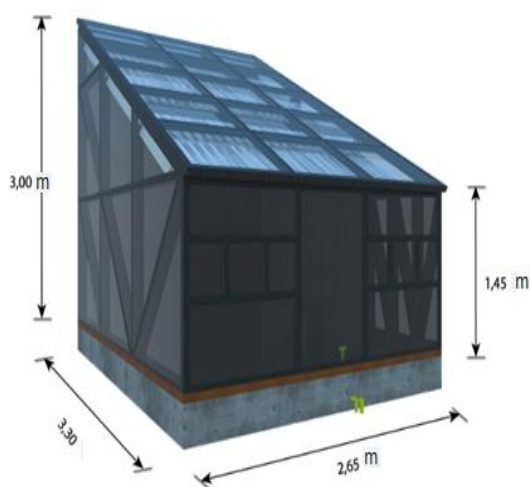
#### 4.3 TEOR DE UMIDADE INICIAL

Para a determinação do teor de umidade inicial das amostras foi empregado o método gravimétrico, onde as amostras úmidas foram submetidas a secagem em estufa a 103°C ± 2 até massa constante, conforme recomendações da Norma Brasileira Regulamentadora – NBR (7190) da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997).

#### 4.4 CONSTRUÇÃO ESTUFA SOLAR

Para a secagem solar foi construída uma estufa no modelo *greenhouse* (Figura 3), no pátio localizado ao lado do prédio de Ciências Florestais e da Madeira (CIFLOMA) na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. O protótipo teve orientação de sua face frontal ao norte para melhor aproveitamento da radiação solar durante o dia e suas dimensões são 2,65 x 3,30 x 1,45 x 3,00 m (Largura x comprimento x altura da parede norte x altura da parede sul), resultando numa capacidade de aproximadamente 1m<sup>3</sup> de madeira.

FIGURA 3 – ESTUFA SOLAR PROJETADA; ESTUFA SOLAR CONSTRUÍDA



FONTE: O autor (2016)

Essa diferença entre as paredes foi devido a inclinação de  $25^\circ$  que a estufa deve ter, seguindo as orientações de Viehbeck (1999), na qual deve ser igual a latitude da Cidade, que em Curitiba é  $25^\circ 25' 40''$ . Isso é explicado como sendo uma média entre a inclinação de solstício e equinócio, dessa maneira há uma melhor absorção da radiação durante todo o ano.

Para a base do equipamento foi realizado uma fundação com blocos de concreto e pedras britas, numa altura de 30 cm acima do solo. A estrutura foi basicamente de madeira de cambará (*Vochysia guianensis* Aubl.), com peças de 5x10 cm de secção transversal (largura e espessura), respectivamente, e comprimentos variados. O assoalho foi construído com compensado de 2,44 cm de espessura, e entre a fundação e as chapas, uma camada de 10 cm de isopor para melhor isolamento.

Para melhor aproveitamento de energia térmica foi acoplado um subteto de alumínio com aletas, fixado 20 cm abaixo do teto e com mesma inclinação, com área nominal de  $6,09\text{m}^2$  e área útil (somado a área das aletas) de  $8,41\text{m}^2$ . Sendo pintado de preto na parte superior para melhor rendimento energético, aumentando a absorção da energia solar térmica no interior da estufa.

Na parede sul, como não há incidência diretamente da radiação solar, o princípio de construção foi similar ao assoalho, com chapas de compensado exteriormente e uma camada interna de 10 cm de isopor. Todas as madeiras foram

pintadas com tinta preta e protegidas com *stain*, para melhor durabilidade e conversão em energia térmica.

As paredes laterais, norte e o teto foram feitas com uma camada dupla de plástico polivinil cloreto (PVC), para estufas como já realizado Troxell (1963), Vital (1976), Santini (1986) e Stangerlin (2009), de 150  $\mu\text{m}$  de espessura e alta resistência ao intemperismo, com o intuito de filtrar as ondas longas da radiação e absorver as ondas de maior energia, com um espaçamento entre camadas transversalmente em 20 cm, otimizando o isolamento térmico. Na parede Frontal, foram instalados dois *dumpers* de 0,25 x 30 cm, com a função de renovação de ar, um para entrada e outro para saída, fixados de uma maneira que o ventilador fique centralizado entre os dois.

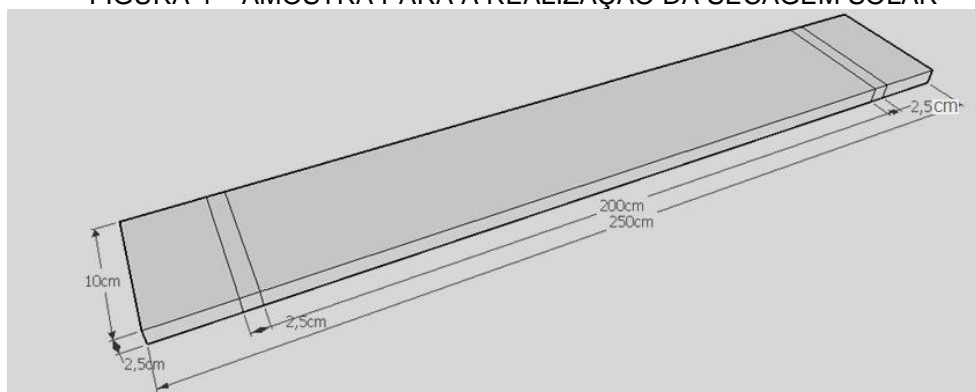
Para a circulação do ar utilizou-se um ventilador com 30 cm de diâmetro, movido por um motor elétrico trifásico de 0,5 CV de potência, fixado sobre o assoalho da estufa. Maior detalhamento dos aspectos construtivos está entre os Apêndices 1 e 2.

Para o estudo foram realizados dois ciclos de secagem, um ciclo de secagem em estufa solar e um em câmara convencional, com o intuito de comparar a qualidade final da madeira nos dois métodos.

#### 4.5 SECAGEM SOLAR

As 63 tábuas selecionadas para a secagem solar foram redimensionadas para 2,5 x 10 x 205 cm, sendo retirada uma amostra de cada extremidade das tábuas de 2,5 x 10 x 2,5 cm para o teor de umidade inicial, resultando em uma amostra para a secagem solar de 2,5 x 10 x 200 cm. O preparo das amostras está representado na Figura 4.

FIGURA 4 – AMOSTRA PARA A REALIZAÇÃO DA SECAGEM SOLAR



FONTE: O autor (2016)

O período das duas secagens foi entre Outubro e Novembro de 2015. O empilhamento no ciclo completo e no híbrido foi de sete filas e nove colunas de tábuas, centralizadas perpendicularmente a estufa e com passagem de ar perpendicular as fibras, como pode ser observado na Figura 5. Três blocos de concreto foram utilizados como restrição mecânica nas peças com massa de 50Kg/m<sup>2</sup>.

FIGURA 5 – DISPOSIÇÃO DA PILHA NA SECAGEM SOLAR



FONTE: O autor (2016)

Para direcionamento do vento foram utilizados defletores, forçando a passagem dentro da pilha. Para o fluxo de ar, seis sarrafos separadores de 2,5 cm de espessura e 2,8 cm de largura foram dispostos perpendicularmente as fibras das amostras de secagem, com um espaçamento de 37 cm entre eles. A velocidade média de ar na saída da pilha foi 0,6 m/s, medida com um anemômetro digital. Para efeito de comparação com a secagem convencional, quando a madeira atingiu aproximadamente 21% de umidade, foi inserido água manualmente na estufa solar,

para elevar a umidade relativa do ar, fato que ocorreu na estufa convencional para recuperação do colapso.

Para a medição de umidade ao longo da secagem foram confeccionadas 10 amostras controle de 10 x 2,5 x 50 cm, dispostas cinco na entrada e cinco na saída de ar, medidas três vezes por semana.

As medições de temperatura e umidade relativa interna da estufa foram feitas com um *data logger Hobo* com precisão de  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$  e 2,5%, de temperatura e umidade relativa, respectivamente, registrando os dados a cada uma hora. Para fins de comparação da calibração do equipamento, um termo-higrômetro digital também foi usado e teve seus dados pontuais coletados três vezes por semana.

Os dados das variáveis externas a estufa solar de temperatura, umidade relativa do ar, foram obtidos junto ao Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar) localizado na Universidade Federal do Paraná. Os dados de radiação solar global foram conseguidos no Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) na estação de Curitiba.

As variáveis de umidade relativa do ar e temperatura da estufa foram comparadas com o ambiente. Por meio desses dados foi possível realizar os cálculos da umidade de equilíbrio ambiente dentro e fora da estufa durante a secagem. As Equações 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam os cálculos para a umidade de equilíbrio (SIMPSON, 1971).

$$UE = \frac{K1 * K2 * h}{1 + K1 * K2 * h} + \frac{K2 * h}{1 - K2 * h} * \frac{1800}{W} \quad (4)$$

$$K1 = 4,737 + 0,04773(T) - 0,00050123(T)^2 \quad (5)$$

$$K2 = 0,70594 + 0,001698(T) - 0,00005553(T)^2 \quad (6)$$

$$W = 223,374 + 0,69309(T) + 0,0185(T)^2 \quad (7)$$

$$h = UR/100 \quad (8)$$

Em que:

UE = Umidade de equilíbrio (%);

UR = Umidade relativa do ar (%)

T = Temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ )

Ao termino da secagem, quando o teor de umidade se tornou estável, a madeira foi retirada da estufa e foram feitas as análises das repetições.

#### 4.5.1 Eficiência térmica da estufa solar

A eficiência térmica máxima da estufa foi baseada na diferença da temperatura diária entre o ambiente externo e interno, e é uma razão entre a quantidade de energia que fica armazenada e a quantidade que chega na estufa. A Equação 9 demonstra os cálculos de rendimento térmico (DUFFIE; BECKMAN, 1991; PENEREIRO; MELO; CORADI, 2010).

$$\eta = \frac{\int_0^t Q_i}{\int_0^t Q_e} = \frac{\int_0^t m \cdot c \cdot (T_e - T_i)}{A \cdot \int_0^t I} \quad (9)$$

Em que:

$\eta$  = Eficiência energética térmica da estufa (%);

$Q_i$  = Quantidade de energia armazenada na estufa solar (KJ);

$Q_e$  = Quantidade de energia que chega a estufa solar (KJ);

$m$  - Massa a ser aquecida de madeira e a massa dos elementos internos da estufa solar (Kg); Massa do fluxo de ar (Kg);

$c$  - Calor específico do ar, da madeira a ser seca e da madeira estrutural da estufa (KJ/Kg°C);

$T_s$  - Temperatura na estufa (°C);

$T_e$  - Temperatura do ambiente externo (°C);

$I$  - intensidade da radiação solar (KJ/m²)

$A$  - área do coletor solar (m²).

Para efeito de comparação a eficiência foi calculada de duas maneiras: a eficiência de pico máxima, que é considerada até às 15 horas do período da tarde



onde em teoria a radiação solar é mais intensa, e a eficiência diária total, que é a eficiência durante o dia todo.

A diferença da quantidade de energia em Joules que a estufa detém a mais que o ambiente (considerando o mesmo volume da estufa, 12,68 m<sup>3</sup>) foi calculada com o elemento Qi da Equação 9, utilizando a diferença de temperatura durante o dia, sendo que ela pode ser expressa pela subtração das integrais das funções da energia relativa interna a estufa (Qri) e energia relativa externa (Qre) como pode ser observado na Equação 10.

$$\sum Q_{de} = \int_0^{23} F(t)dt - \int_0^{23} f(t)dt \quad (10)$$

Em que:

Qde: Quantidade de energia;

F(t): Função polinomial da energia interna à estufa solar em 12,68 m<sup>3</sup> a partir da temperatura de 0°C;

f(t): Função polinomial da energia externa à estufa solar 12,68 m<sup>3</sup> a partir da temperatura de 0°C;

t: horário em horas do dia;

#### 4.5.2 Placas fotovoltaicas planas

As placas fotovoltaicas planas foram avaliadas como de potencial uso para o ventilador na estufa solar. Os dados foram coletados no Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR) localizado em Curitiba, Paraná, entre os meses de Fevereiro e Setembro de 2015. Os painéis são de silício policristalino da marca Canadian Solar e possuem 2,5 KWp de potência nominal, 16,7 m<sup>2</sup> de área e eficiência nominal de 15,4%. Foram realizadas medições de rendimento, e potência gerada diariamente, e a energia foi transferida a um controlador de carga e um inversor de frequência. A Equação 11 demonstra os cálculos de eficiência das placas (MOREIRA, 2009; NIEDZIALKOSKI, 2013).

$$\eta = \frac{E_g}{E_r} \quad (11)$$

Em que:

$\eta$  = eficiência das placas;

$E_g$  = Energia gerada pelas placas (KWh);

$E_r$  = Energia recebida pelas placas (KWh);

Como o investimento nos painéis é relativamente alto, quando comparados ao preço da estufa, preferiu-se utilizar essa colaboração com a TECPAR, para conferir a viabilidade. As placas foram acopladas em uma estrutura metálica fornecida pelo fabricante e ligados em série-paralelo. A Figura 6 demonstra as placas instaladas.

FIGURA 6 – PLACAS FOTOVOLTAICAS PLANAS UTILIZADAS NO ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA



FONTE: O autor (2016)

#### 4.5.3 Dimensionamento das placas fotovoltaicas

Para o dimensionamento da energia necessária para alimentar o motor foi estabelecido que as placas fornecessem 0,5 CV (Cavalo-vapor) por hora, capaz de suprir a demanda do ventilador. Como o motor deve ficar ligado em média 8 horas por dia, foi adotado um sistema que possa fornecer 4CV diariamente. É importante também no dimensionamento, colocar uma margem de segurança, que nesse projeto foi adotado 30% a mais com uma eficiência estimada mínima de 13%.

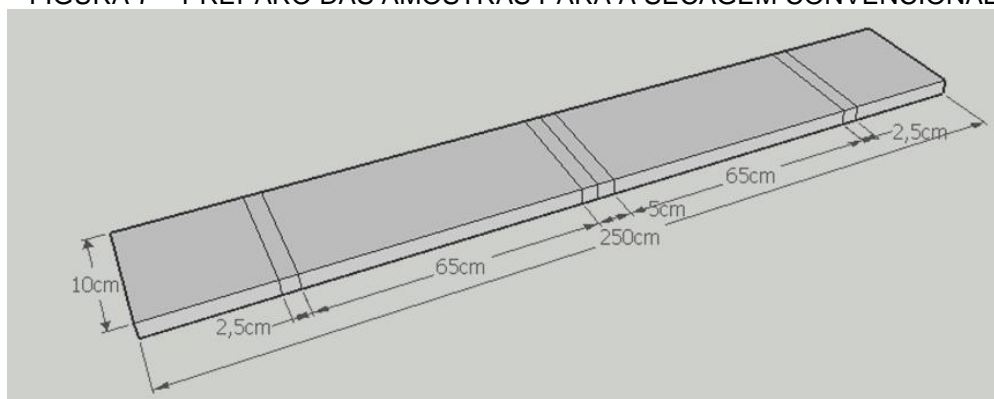
Dessa forma um sistema capaz de suprir essa demanda, deve fornecer 156 CV ou 113 KWh mensais, considerando 30 dias de trabalho do equipamento, e para isso a potência instalada deve ser de 1,47 KWp (Kilowatt-pico), e uma área ocupada mínima de 9m<sup>2</sup>, com 6 placas de 250W e 12V, atendendo a cálculos realizados no simulador do Portal Solar (2015). No sistema é considerando as placas, o inversor de frequência e controlador de carga. A vida útil desse sistema é de 20 anos fornecida pela maioria dos fabricantes.

Uma bateria estacionária, que é recomendada para esse tipo de sistema, também será considerada para momentos que a energia solar não seja plena, podendo suprir o sistema durante 4 horas. Para esse sistema, durante esse tempo a bateria deve ter 160A, e ela deve ser substituída a cada cinco anos, considerando a vida útil fornecida pelos fabricantes.

#### 4.6 SECAGEM CONVENCIONAL

As amostras para secagem convencional foram redimensionadas para 2,5 x 10 x 70 cm (Figura 7) a partir das tábuas originais, sendo retirada uma amostra de cada extremidade de 2,5 x 10 x 2,5 cm das tábuas para o teor de umidade inicial, resultando em amostras de 2,5 x 10 x 65 cm, totalizando 60 tábuas para a secagem.

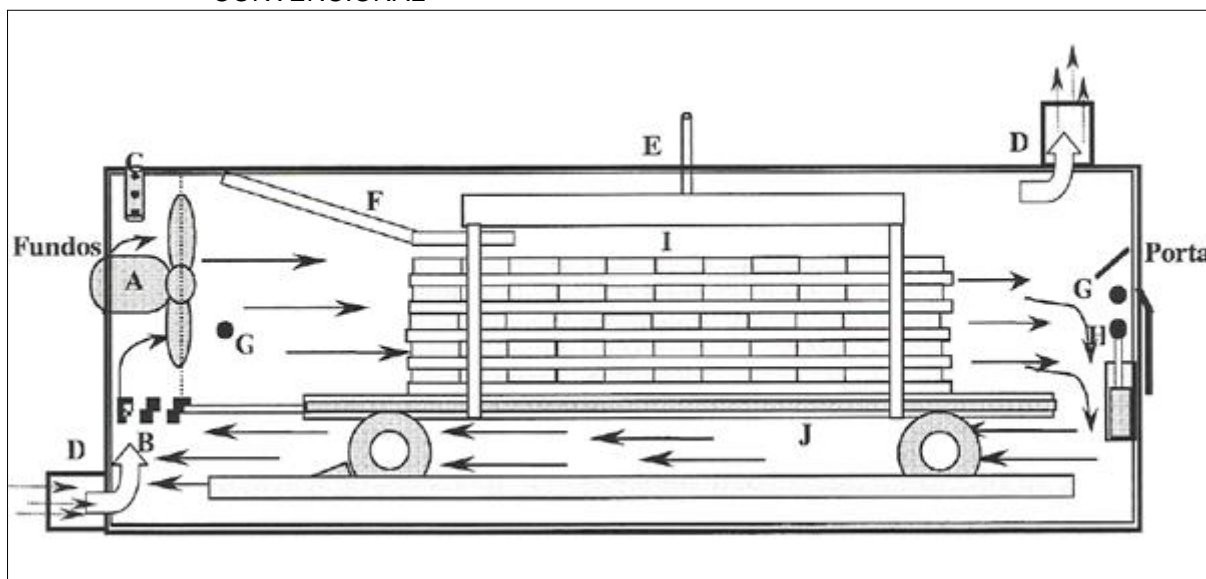
FIGURA 7 – PREPARO DAS AMOSTRAS PARA A SECAGEM CONVENCIONAL



FONTE: O autor (2016)

Para a secagem convencional foi utilizada uma câmara de secagem piloto, com dimensão nominal útil de 0,80 x 0,80 x 4,00 m (largura x altura x comprimento), totalizando uma capacidade de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada (Figura 8). O aquecimento ocorreu por sistema elétrico, sendo realizado por três resistências blindadas (trocadores de calor) de 9KW (46000 BTU) e dotada de circulação forçada de ar, no qual, ocorre por um ventilador do tipo axial de 8 pás, 60 cm de diâmetro, com produção de 3600 m<sup>3</sup>/h, movido por um motor de 4 pólos, 1,5CV e rotação de 1750 rpm.

FIGURA 8 – LAYOUT DA ESTUFA PILOTO SEMI- INDUSTRIAL PARA A SECAGEM CONVENCIONAL



FONTE: Klitzke (2002)

Em que:

A= Motor do ventilador;

B = Resistência elétrica;

C = Injeção de vapor saturado;

D = Entrada e saída de ar;

E = Sistema de suspensão de carga; balança (não utilizado);

F = Sistema de deflexão do ar;

G = Termômetros do tipo PT 100(TBS);

H = Termômetros do tipo PT 100(TBU);

I = Madeira gradeada;

J = Carro transportador.

A umidade relativa da câmara foi controlada pelo sistema injeção de vapor direta, sendo gerado por uma caldeira elétrica com capacidade de produção de vapor de 40 kg/h, com potência de 6 KW, e por um conjunto de dumpers proporcionais. O controle ambiental e coleta de dados foram realizados por um controlador lógico programável (CLP) acoplado a um microcomputador e um software disponível no mercado (Smartdry da empresa Marrari).

O empilhamento foi disposto em seis camadas com 10 tábuas cada, totalizando 60 tábuas, alocadas sobre um vagonete, separadas por um sarrafo separador em cada extremidade, de 2,5 x 2,8 (espessura e largura). O ventilador é disposto para passagem do ar perpendicular as fibras das tábuas. A Figura 9 demonstra o empilhamento e a disposição dos pinos sensores.

FIGURA 9 – DISPOSIÇÃO DA PILHA PARA A SECAGEM CONVENCIONAL E DOS PINOS SENSORES



FONTE: O autor (2016)

A medição da umidade das madeiras ocorreu por oito pares de pinos sensores (oito longos e oito curtos), os quais possuem o princípio de funcionamento resistivo. Os pinos foram introduzidos na madeira a  $1/2$  e a  $1/4$  da espessura das tábuas, no sentido perpendicular a grã, distantes 25 mm entre si, visando medir o gradiente de umidade durante o processo de secagem. A cada tábua que possuía os pinos sensores, era disposta de um par introduzido a  $1/2$  da espessura (pino longo) e outro par de pino sensor introduzido a  $1/4$  (pino curto) da espessura da tábua.

A fim de verificar a perda de umidade das madeiras, bem como, as variações dimensionais em largura, espessura do ciclo de secagem, suas massas e dimensões foram aferidas no início e após a secagem. Para o controle gravimétrico da perda de umidade foram tomadas as massas de seis amostras controle diariamente ao longo de todo o período da secagem. Para o monitoramento da variação dimensional foram realizados medições com auxílio de um paquímetro de 0,01 mm de precisão, sendo as medições realizadas a 10 cm das extremidades das peças.

#### 4.6.1 Programa de secagem

O programa de secagem utilizado está representado na Tabela 1, sendo aplicada uma vaporização intermediária com vapor saturado (100C° e 100% de UR) na fase 7 para recuperação do colapso (BLUHM & KAUMAN, 1965; SEVERO, 2000).

TABELA 1 – PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADADO PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* ssp. COM 2,5 CM DE ESPESSURA

	Fase	Teor de umidade (%)	TBS (°C)	TBU (°C)	UR (%)	Ue (%)	PS
Secagem	AQC.	5 horas	40	40	100	-	-
	1	42	40	38	88	18	2,4
	2	37	42	39	83	16	2,2
	3	32	45	42	84	16	2,2
	4	28	48	44	79	14	2,1
	5	24	50	44	70	12	2,1
	6	21	53	46	66	10	2,1
	7	17	100	100	100	19	-
	8	14	58	46	51	8	2,1
	9	12	60	46	44	6	2,1
	10	10	63	42	30	4	2,1
	ACON.	8 horas	69	51	64	10	-

Nota: TBU: Termômetro de bulbo seco; TBU: termômetro de bulbo úmido; UR: Umidade relativa do ar; Ue: umidade de equilíbrio da madeira; PS: Potencial de secagem; AQC: Aquecimento; ACON: Acondicionamento.

FONTE: Batista (2009) modificado pelo autor (2016)

Foi utilizado como velocidade de circulação do ar para secagem em câmara convencional 2,5 m/s como descrito em diversos manuais de secagem de madeiras como Hildebrand (1970), Siau (1984), Simpson (1991). Para isso, por meio de testes empíricos e com o auxílio de um anemômetro adotou-se 85% da rotação do ventilador.

#### 4.6.2 Taxa de secagem

A taxa de secagem foi determinada para os dois métodos de secagem adotando a metodologia de Severo (2000) por meio da Equação 12. Sendo que o mais apropriado para a secagem solar seja o tempo em dias e para a convencional

em horas, entretanto, foram calculados os dois tempos para os dois métodos visando uma comparação. Foram avaliadas aleatoriamente 30 repetições por ciclo de secagem.

$$TS = \frac{TU_i - TU_f}{t} \quad (12)$$

Em que:

Ts – Taxa de secagem (%U/dia ou %U/h)

TU<sub>i</sub>- Teor de umidade inicial

TU<sub>f</sub>- Teor de umidade final

t – tempo

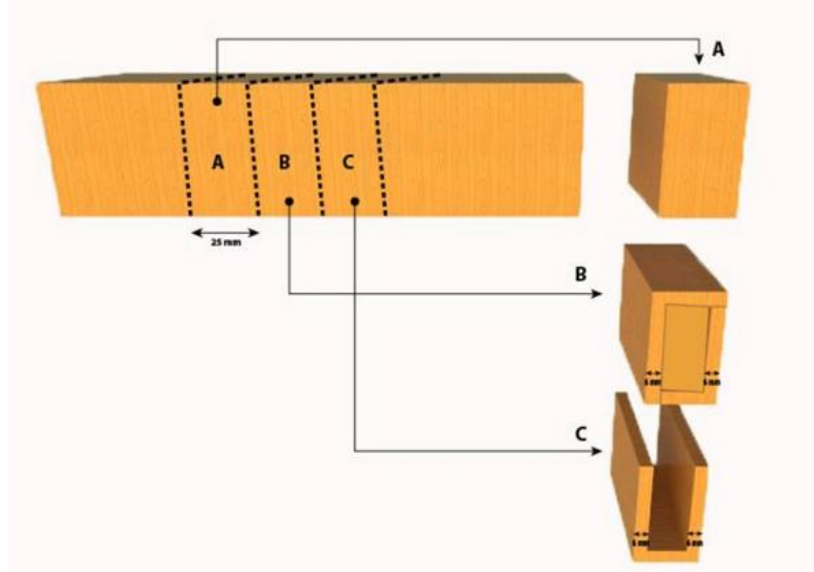
Foi quantificada a taxa de secagem para a perda de água capilar (acima do PSF até 32%), higroscópica (32% até 10%) e total (Acima do PSF até 10%).

#### 4.7 TEOR DE UMIDADE FINAL, GRADIENTE DE UMIDADE E TENSÕES DE SECAGEM

Para a avaliação do teor umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem utilizou-se a metodologia sugerida por Simpson (1991), conforme elucida a Figura 10, em que foram utilizadas para cada variável (teor de umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem) 30 amostras, totalizando 90 repetições por método de secagem.



FIGURA 10 – MÉTODO DE PREPARO DE AMOSTRAS PARA A AVALIAÇÃO DA SECAGEM; TEOR UMIDADE FINAL (A), GRADIENTE DE UMIDADE (B) E TENSÕES DE SECAGEM (C)



FONTE: Modificado de Jankowsky (1985).

Para todas as amostras em que foram aferidas a umidade, o procedimento de análise foi realizado pelo método gravimétrico, conforme recomendações da NBR 7190 (1997). Para avaliação das tensões de secagem foram utilizadas as amostras (C) conforme a Figura 11 demonstra.

FIGURA 11 – PROCEDIMENTO ADOTADO PARA A CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM



FONTE: Modificado de Jankowsky (1985).

#### 4.8 CONTRAÇÃO DA MADEIRA

A avaliação da contração em largura e espessura foi realizada com medições nas dimensões das peças antes e após a secagem conforme a Equação 13, não

sendo considerada a contração longitudinal. Totalizando 30 repetições por ciclo de secagem.

$$\text{Contração} = \frac{D_u - D_s}{D_u} * 100 \quad (13)$$

Em que:

$D_u$  = Dimensão ou volume úmido (mm ou mm<sup>3</sup>);

$D_s$  = Dimensão ou volume seco (mm ou mm<sup>3</sup>).

#### 4.9 INCIDÊNCIA DE DEFEITOS

Foram medidas as flechas dos empenamentos (arqueamento, encurvamento e encanoamento) e a somatória das rachaduras ao longo da tábua e de topo conforme a Norma para Classificação de Folhosas do IBDF - Classificação pela Pior Face (BRASIL, 1983) de 30 repetições em cada ciclo de secagem. A medição dos defeitos antes da secagem foi realizada a fim de se verificar o aumento ou não dos mesmos após as peças passarem por este processo. Depois de realizada a secagem dos ciclos, foram medidos novamente os empenamentos e as rachaduras.

As medidas de arqueamento foram realizadas conforme a Figura 12, onde se utilizou a Equação 14.

$$A = \frac{f}{c} \quad (14)$$

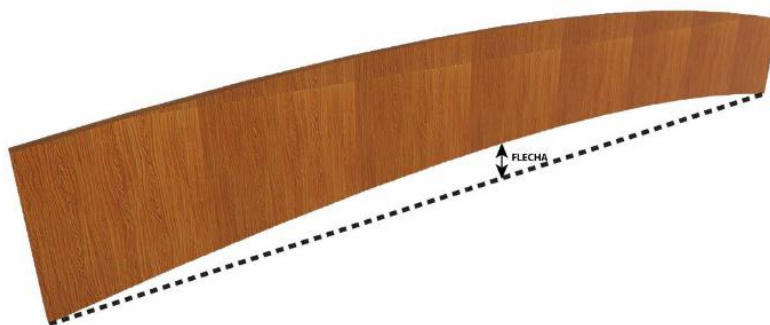
Em que:

$A$  = Arqueamento (mm/m)

$f$  = Flecha de arqueamento (mm)

$c$  = Comprimento da peça (m)

FIGURA 12 – DEMOSTRAÇÃO DA MEDIÇÃO DO ARQUEAMENTO



FONTE: O autor (2016)

O encurvamento foi verificado conforme a Figura 13 e utilizando a seguinte Equação 15:

$$Ev = \frac{f}{c} \quad (15)$$

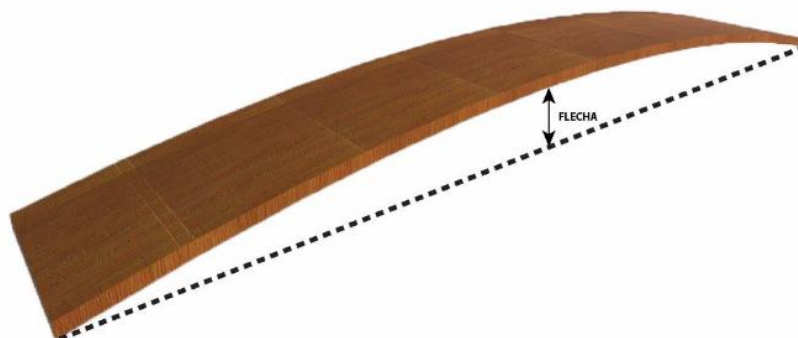
Em que:

Ev = Encurvamento (mm/m)

f = Flecha de encurvamento (mm)

c = Comprimento da peça (m)

FIGURA 13 – DEMONSTRAÇÃO DA MEDIÇÃO DO ENCURVAMENTO



FONTE: O autor (2016)

O encanoamento foi obtido conforme a Figura 14, e seus valores foram apresentados como sua flecha máxima em milímetros.

FIGURA 14 – DEMONSTRAÇÃO DA MEDIÇÃO DO ENCANOAMENTO



FONTE: O autor (2016)

Para o arqueamento e encurvamento, as tábuas que apresentaram índices acima de cinco mm/m foram classificadas como defeituosas e para o encanoamento (Equação 16) valores acima de 4 mm foram considerados defeituosas.

$$Ea \geq (En - 4\text{mm}) \quad (16)$$

Em que:

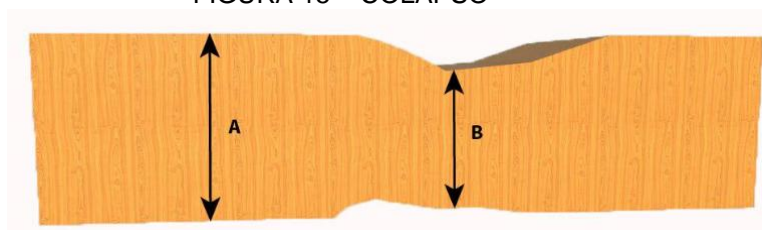
Ea = Espessura aplainada (mm);

En= Espessura nominal;

O colapso (Figura 15) foi avaliado quanto a presença e a ausência, e se caso fosse presente, quantificado a diferença entre as espessuras A e B (Equação 17).

$$\text{Colapso} = A - B \quad (17)$$

FIGURA 15 – COLAPSO



FONTE: O autor (2016)

Na avaliação dos defeitos não foi considerado as rachaduras, pois as mesmas foram retiradas na confecção das tábuas para a secagem, tornando assim essa análise tendenciosa.

#### 4.10 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para análise e avaliação estatística dos resultados, procedeu-se análise de variância (ANOVA) comparando os resultados da secagem solar e da secagem convencional, sendo que nas situações em que a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) foi rejeitada considerou-se diferente estatisticamente. Quando necessário, aplicou-se uma análise de regressão, selecionando o modelo que apresentou o melhor ajuste, levando-se em consideração o coeficiente de determinação  $F$  e o erro padrão da estimativa  $S_{yx}$ .

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 TEOR DE UMIDADE INICIAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 12%

Os resultados do teor de umidade inicial e de massa específica aparente a 12% de umidade das madeiras secas nos métodos estudados estão apresentados na Tabela 2. Nota-se que houve diferença estatística no teor de umidade inicial, e que foi equivalente a 14,54 pontos percentuais acima, quando comparados a secagem solar.

TABELA 2 – TEOR DE UMIDADE INICIAL; MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 12% DE UMIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp.

Método	TUi (%)	Me <sub>12%</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
Secagem solar	80,97 A	
	(27,04; 33,39)	0,60
Secagem convencional	66,43 B	(0,11; 18,56)
	(17,41; 26,21)	

Nota: TUi: Teor de umidade inicial; Me<sub>12%</sub>: Massa específica aparente a 12% de umidade. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%). Letras maiúsculas diferentes correspondem a diferença estatística entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Stangerlin (2009) encontrou valores de teor de umidade inicial para o *Eucalyptus saligna* de 74,07% antes de uma secagem solar e de 75,62% antes de uma secagem ao ar livre, valores intermediários aos encontrados nesse estudo. Batista (2009) obteve um valor médio de teor de umidade de 63,49% para o *Eucalyptus saligna* e 79,91% para o *Eucalyptus grandis*, valores muito próximos aos encontrados na secagem convencional e secagem solar dessa pesquisa.

Outro autor que trabalhou com o teor de umidade inicial de *Eucalyptus saligna* foi Susin (2012), encontrando um resultado de 64,70% de umidade. Rocha (2000) em um estudo com toras de *Eucalyptus grandis* obteve como resultado um valor médio de 89,38%. A diferença entre o teor de umidade da secagem convencional com a secagem solar deve-se ao fato da madeira de eucalipto apresentar grande variação na umidade inicial, sendo entre 60% e 100% (BAUER, 2003). Dessa forma os resultados encontrados estão de acordo com a literatura.

O teor umidade inicial encontrado está próximo aos valores encontrados pelos outros autores apresentados que estudaram *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus*

*grandis*, entretanto, há variação entre as cargas. Esse fato pode ter ocorrido pelo motivo de não ter havido controle na proporção de cada espécie, e as propriedades intrínsecas de cada material tem influência no teor de umidade. O tempo entre a derrubada, transporte, estocagem, desdobro e secagem dessa madeira utilizada na pesquisa, também pode ter influenciado nessa variação.

Para a massa específica aparente, Batista (2012) encontrou para espécie de *Eucalyptus grandis* a 11,5% de umidade, valor próximo ao 12% desse estudo, com 18 anos de idade, um valor de 0,49 g/cm<sup>3</sup>, abaixo do encontrado nessa pesquisa. Rocha (2000) para mesma espécie numa idade 12 anos obteve um valor médio de 0,59 g/cm<sup>3</sup>, muito próximo do valor encontrado. Silva (2004) encontrou para as idades de 10,14 e 20 anos, 0,46, 0,55, 0,60 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, para essa mesma essência.

Para a espécie de *Eucalyptus saligna*, Alzate (2003) obteve valores de massa específica aparente entre 0,52 g/cm<sup>3</sup> e 0,58 g/cm<sup>3</sup>, não citando qual foi a idade da madeira utilizada. Susin (2012) encontrou para uma idade muito superior, de 40 anos, na mesma espécie um valor de 0,89 g/cm<sup>3</sup>. O resultado obtido nesse estudo está condizente com a literatura, sendo que essa propriedade pode variar para essas espécies entre 0,40 até 1,20 g/cm<sup>3</sup> (OLIVEIRA, 1999)

A massa específica tem grande influência no tempo de secagem (HART, 1966; KOLLMANN; CÔTÊ JUNIOR, 1968). Segundo a classificação do IBAMA (1991), a massa específica encontrada nesse estudo é considerada média. A madeira de eucaliptos possui baixa permeabilidade mesmo não tendo uma massa específica alta, isso ocorre porque ela apresenta pequenos elementos celulares, tiloses na sua estrutura e formação precoce de cerne (PONCE; WATAI, 1985; SIAU, 1995, KLITZKE 2007). Como não houve distinção entre o *Eucalyptus grandis* e o *Eucalyptus saligna*, não se pode afirmar qual delas teve maior influência na média final de massa específica.

## 5.2 TEMPO DE SECAGEM E TEOR DE UMIDADE FINAL

A Tabela 3 demonstra os resultados do tempo de secagem para a secagem solar e secagem convencional, em dias e em horas, para melhor comparação entre os métodos, e do teor de umidade final. É possível notar uma grande diferença de

entre os métodos de 23,55 dias ou aproximadamente 565 horas entre o tempo da secagem solar com a convencional, ocorrendo diferença estatística no teor de umidade final entre os métodos de secagem.

TABELA 3 – TEMPO DE SECAGEM E TEOR DE UMIDADE FINAL PARA A SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

Método de secagem	Tempo (horas)	Tempo (dias)	TUf (%)
Secagem Solar	744	31	11,88 B (1,28; 10,77)
Secagem convencional	179	7,45	9,92 A (2,43; 24,46)

Nota: TUf: Teor de umidade final da madeira. Entre parênteses estão os valores de desvio padrão e coeficiente de variação (%) no teor de umidade final da madeira, respectivamente.

Observa-se que a secagem convencional foi quatro vezes mais rápida que a secagem solar, resultado esperado para o método. Fato ocorrido conforme a literatura, em que em nenhum caso a secagem solar se torna mais eficiente que a secagem convencional, sendo a segunda com maior tecnologia envolvida e melhor controle do sistema e das variáveis (SANTINI, 1981). Segundo a classificação de Brasil (1981) e Martins (1989), citados por Brandão (1989) e por Batista et al. (2015), o tempo obtido na secagem solar foi muito lenta quando comparada com a secagem convencional. Entretanto, no caso da secagem solar, comparando com outros autores, Sudam e IPT (1981), Bois (1977), Haque (2002); Ono e Ventorino (2006) e Ono (2006), a secagem foi rápida.

Stangerlin (2009) obteve um tempo menor na secagem solar, secando em 22 dias a espécie de *Eucalyptus saligna* de 74,04% para 15,06% de teor de umidade final, esse tempo pode ser explicado porque o autor finalizou a secagem com um teor de umidade final maior que o dessa pesquisa. Souza (2015) obteve resultados compatíveis com esse estudo na secagem solar em que o teor de umidade inicial para a madeira de *Eucalyptus dunnii* estudada foi de 82,98% e após 30 dias de secagem em estufa solar, obteve-se o teor de umidade final de 12,84%. Porém, Ono e Ventorino (2006) e Ono (2006) em seus estudos com *Eucalyptus camaldulensis* com tábuas de 4 cm de espessura, em Montevideo no Uruguai, secaram a madeira de 60% a 12% de umidade em 90 dias no inverno e 76 dias no verão, respectivamente, tempo de secagem maior que o dessa pesquisa, demonstrando



que a secagem ocorrida nessa pesquisa também foi influenciada pelas tábuas não terem espesura elevada.

Para a secagem convencional Severo (2000) obteve um tempo de 180, 120 e 75 horas para potenciais de secagem de 4,5, 3,5 e 2,5, respectivamente, com umidades iniciais de 80,2, 76,1, 75,1% até atingir 12% de umidade final. Resultados que corroboram com esse estudo quando o potencial de secagem é similar (2,5).

Os autores Batista, Klitzke e Rocha (2015) obtiveram resultados de 453 horas para a secagem convencional, de cargas com três espécies, sendo elas, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus saligna*, resultado que é mais que o dobro alcançado nesse estudo. Ciniglio (1998) na secagem de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* obteve 648 horas de tempo de secagem convencional, Santos (2002) obteve 1680 horas na secagem de *Eucalyptus grandis*. E Santos et al. (2008) alcançou 408 horas de tempo secagem convencional com umidade inicial de 53% para atingir 12% de umidade final, com madeiras de *Eucalyptus* sp.

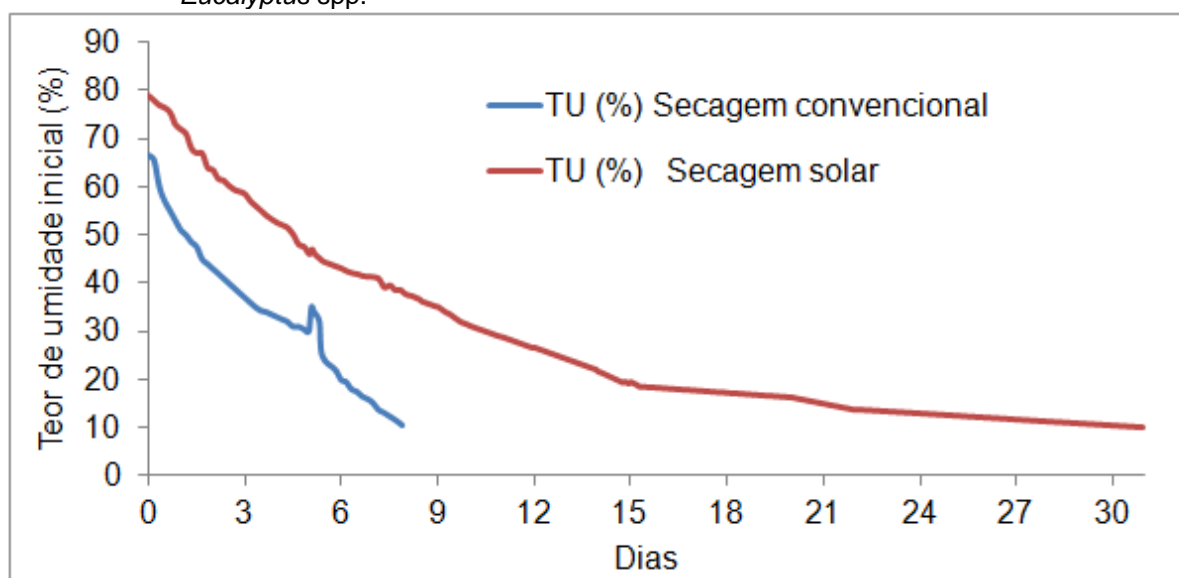
Apesar de alguns resultados serem compatíveis com os desse estudo, como os de Stangerlin (2009), Severo (2000) e Souza (2015), ele é consideravelmente mais rápido que a maioria das secagens realizadas com madeiras do gênero *Eucalyptus*, um estudo detalhado sobre o conteúdo químico e os aspectos anatômicos seria necessário para respostas mais precisas, sabendo que isso pode influenciar diretamente na velocidade de secagem (KLITZKE, 2007).

A secagem solar apresentou teor de umidade final diferente estatisticamente da secagem convencional, porém, a gama de produtos que podem ser feitos com essas umidades é bem similar, dessa forma, é competitiva em termos de produto final. Mesmo sendo uma espécie de baixa permeabilidade apresentada pela madeira que foi seca, as relativas altas temperaturas e baixas umidades relativas na estufa solar durante o dia, garantiram uma alto potencial de secagem atingindo um teor de umidade final baixo. Para Martins (1988) esses teores de umidade são aplicáveis comercialmente para construções externas, internas e móveis, agregando valor ao produto.

A evolução dos estudos genéticos e dos tratamentos silviculturais que vem ocorrendo com esse gênero também pode influenciar na melhoria das propriedades desse material, o que pode ser considerado na diminuição do tempo de secagem dos estudos mais recentes (XAVIER et al., 1997; COSTA et al., 2012). A proporção

de lenho adulto e lenho juvenil pode também ser analisado na velocidade de secagem, sendo que a madeira por ter aproximadamente 15 anos, pode possuir uma maior quantidade de lenho juvenil. Do ponto de vista científico, uma secagem rápida, em ambos os métodos, é entusiasmante tendo em vista que o eucalipto é uma madeira que tem muito potencial para serraria e isso ainda não foi totalmente explorado. As curvas da secagem solar e da secagem convencional podem ilustrar melhor o tempo de secagem e são observadas na Figura 16.

FIGURA 16 – CURVA DA SECAGEM SOLAR; CURVA DA SECAGEM CONVENCIONAL DE *Eucalyptus* spp.



FONTE: O autor (2016)

Na secagem solar a madeira atingiu o Ponto de Saturação das Fibras (PSF) em torno de 10 dias, enquanto Loiola et al. (2015) obteve resultados superiores para a secagem solar de *Eucalyptus dunnii*, atingindo 30% de umidade em 30 dias. Para atingir o teor de umidade desejado (10%) foram necessários mais 20 dias na secagem solar, demonstrando a grande dificuldade na retirada da água de difusão, localizada na parede celular.

Pode-se observar que na secagem convencional o tempo de secagem de 66% até o PSF foi de apenas 120 horas, ou seja, cinco dias, necessitando de mais três dias para finalizar a secagem até 10%. O emprego da recuperação do colapso durante a secagem convencional quando a madeira atingiu 30% favoreceu a secagem e reduziu os defeitos. Em relação ao tempo de secagem houve uma diminuição de 74,5%, ou seja, a secagem solar foi quatro vezes mais lenta do que

na secagem convencional, resultado similar ao encontrado por SANTINI (1981) onde obteve um tempo de secagem de 23 dias para a secagem solar e 167 horas na secagem convencional para madeira de canela preta (*Ocotea catharinensis* Mez).

Outro fato que pode ser observado na Figura 16 é que após a vaporização houve um decaimento na curva de secagem, que pode ser explicado por um aumento que ocorre na taxa de secagem (SEVERO, 2000). Makay (1971) afirma que quando há esse tipo de tratamento, aumenta o coeficiente de difusão, aumentando a velocidade de secagem. A Tabela 4 demonstra as equações ajustadas para os métodos utilizados e pode ser observado que ambas apresentaram um coeficiente de correlação acima de 0,90.

TABELA 4 – RELAÇÃO DE DEPENDÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO; EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA AS CURVAS DE SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

Método	Equação ajustada	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Syx	F
Secagem Solar	TU = -19,91*ln(t) + 76,7	0,97	0,17	364,28**
Secagem convencional	TU = -0,5294*t <sup>3</sup> + 5,8883*t <sup>2</sup> - 22,127*t + 53,059	0,95	2,48	950,36**

Nota – R<sup>2</sup><sub>aj</sub>: Coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro padrão da estimativa; F: fator de significância; \*\* nível de significância 1%.

### 5.3 TAXA DE SECAGEM

As taxas de secagem podem ser notadas na Tabela 5, tanto em %/h e %/dia para melhor comparação, observa-se que a secagem convencional é duas vezes mais rápida acima do PSF e aproximadamente quatro vezes mais rápida abaixo do PSF que a secagem solar, comprovando a maior velocidade de secagem no método mais automatizado.

TABELA 5 – TAXA DE SECAGEM PARA A SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

Método	TS (%/h)			TS (%/dia)		
	U-32%	U-10%	32%-10%	U-32%	U-10%	32%-10%
Secagem solar	0,17	0,08	0,04	4,16	2,01	0,98
Secagem Convencional	0,34	0,29	0,25	8,02	7,15	6,11

Nota – TS: Taxa de secagem; U: Teor de umidade inicial.

A diferença na retirada de água capilar e a água higroscópica é notável, sendo aproximadamente quatro vezes maior no método convencional e 30% superior no método de secagem solar, esse fato ocorre, pois no início de ambos os métodos a temperatura demandada é similar (40°C), mas a quando o teor de umidade da madeira diminui, as temperaturas na secagem convencional aumentam com o programa de secagem, variável que a secagem solar não pode atingir e não é controlável, dessa maneira a secagem convencional tem uma compensação maior da taxa de secagem na retirada de água higroscópica.

Outro fato que pode ser apontado é diminuição de temperatura e aumento da umidade relativa que ocorre durante a noite dentro da estufa solar, diminuindo o pontencial de secagem.

Para a secagem solar Souza (2015) obteve uma taxa de secagem média de 2,33%/dia, ou 0,10%/hora, para a espécie de *Eucalyptus dunnii*, valores ligeiramente superiores aos encontrados nessa pesquisa. Stangerlin (2009) no mesmo método de secagem obteve 3,39%/dia acima do PSF, 1,69%/dia abaixo do PSF, e 2,7%/dia de média, para o *Eucalyptus saligna*, valores considerados altos para a secagem solar, assim como os desse estudo. Santini (1981) obteve uma taxa de secagem de 4%/dia de média, valor que corrobora com o dessa pesquisa. Por outra via, Ono e Ventrino (2006) e Ono (2006) usando *Eucalyptus camaldulensis* com tábuas de 4 cm de espessura, atingiram 0,63%/dia e 0,53%/dia, no verão e no inverno respectivamente, sendo muito abaixo dos valores encontrados para esse estudo. A Tabela 6 demonstra alguns estudos com folhosas pelo mundo para efeito comparativo.

TABELA 6 – TEMPO DE SECAGEM E TAXA DE SECAGEM EM VÁRIOS LOCAIS DO MUNDO PARA MADEIRA DE FOLHOSAS NA SECAGEM SOLAR

Autor	Local	Ti-Tf (%)	Ts(dias)	Tx(%/dia)
Johnson (1961)	Wiscosin (USA)	50-8	95	0,44
		60-6	52	1,04
Peck (1962)	Wiscosin (USA)	70-20	24	2,08
		75-20	34	1,62
		80-20	105	0,57
Chudnoff, Maldonado e Goytía (1966)	Rio Piedras (PRI)	35-8	25	1,08
Plumptre (1967)	Kampala (UGA)	112-12	27	3,7
		50-15	41	0,85
Read et al. (1974)	New South Wales (AUS)	100-6	20	4,7
Vital (1976)	Minas Gerais (BRA)	56-16	21	1,90
Bois (1977)	Wiscosin (USA)	85-12	47	1,55
		60-6	52	1,04
		50-8	218	0,19
Chen e Rosen (1979)	Illinois (USA)	95-15	8	10
Tschernitz e Simpson (1979)	Wiscosin (USA)	84-9	54	1,39
Steinmann, Vermaas e Forrer (1980)	Stellenbosch (ZAF)	93-12	16	5,06
Gough (1981)	Queensland (AUS)	27-12	62	0,24
Lumley e Choong (1981)	Louisiana (USA)	50-7	20	2,15
Santini (1981)	Paraná (BRA)	93-12	23	3,52
SUDAM/IPT (1981)	Pará (BRA)	80-17	103	0,61
		90-11	103	0,77
		47-10	103	0,36
		28-9	73	0,26
Moraes-Duzat et al. (2003)	Amazonas (BRA)	65-8	28	2,04
		77-10	33	2,03
		84-13	12	5,91
		70-9	17	3,59
Haque (2002)	Wauchope (AUS)	55-16	55	0,71
Bauer (2003)	Minas Gerais (BRA)	59-12	27	1,74
Rodríguez et al. (2003)	Yucatán (MEX)	115-19	35	2,74
Stangerlin (2009)	Santa Maria (BRA)	82-15	35	1,91
		74-15	22	2,70

Nota – Ti: Teor de umidade inicial; Tf: Teor de umidade final; Ts: tempo de secagem; Tx: Taxa de secagem.

FONTE: Modificado de Santini (1981) e Stangerlin (2009).

O resultado do tempo de secagem e da taxa de secagem para a estufa solar corresponde a um valor menor e maior, respectivamente, que a maioria dos autores da literatura. Fato que pode ser explicado pelas características intrínsecas das

espécies que os outros autores utilizaram, pelo tipo de equipamento utilizado, época do ano, condições e o local de onde foi construída estufa.

No caso da secagem convencional, Batista et al.(2015) encontraram uma taxa de secagem de 0,14%/hora, Susin (2012) obteve 0,11%/h, com uma alta massa específica aparente a 12% de 0,89 g/cm<sup>3</sup>, Santos, Jankowski e Andrade (2003) alcançaram 0,15%/h, sendo que todos esses valores são mais comuns na literatura e menos da metade do valor encontrado nesse estudo. Entretanto, Severo (2000) obteve um valor de 0,36%/h, sendo esse, bem próximo ao achado nessa pesquisa. Ainda o mesmo autor, testando três programas de secagem, relatou como o potencial de secagem influenciou diretamente no tempo de secagem, fato que pode ter influenciado nesse estudo também, pois com um potencial similar, atingiu uma taxa semelhante, confirmando uma secagem mais rápida da madeira de *Eucalyptus* spp.

#### 5.4 CONTRAÇÃO DA MADEIRA

A contração volumétrica das tábuas na secagem solar e na secagem convencional estão apresentadas na Tabela 7.

TABELA 7 – CONTRAÇÃO PARCIAL EM LARGURA, ESPESSURA E VOLUMÉTRICA NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

	Secagem solar		
	CL (%)	CE (%)	Contração volumétrica (%)
Média	6,66 A	4,62 B	11,35 C
DP	1,84	2,02	1,93
CV	29,70	53,57	42,68
	Secagem Convencional		
	CL (%)	CE (%)	Contração volumétrica (%)
Média	6,95 A	4,86 B	11,88 C
DP	2,24	2,03	2,13
CV	32,26	41,73	38,92

Nota- CL: Contração em largura; CE: contração em espessura; DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação (%).

Rocha (2000), obteve para a madeira de *Eucalyptus grandis*, em média uma contração de 3,25% em largura e 4,17% em espessura, valores menores que esse estudo, porém a umidade final atingida pelo autor foi de 15%, 5% maior que nesse

estudo, por esse motivo a madeira retraiu menos. Stangerlin (2009) para *Eucalyptus saligna* alcançou uma contração na largura de 3,64% e na espessura de 4,5%, sendo que a largura demonstrou um valor bem abaixo desse estudo.

Ono e Ventorino (2006) para uma madeira de *Eucalyptus camaldulensis* de maior espessura, 4 cm, apresentou uma contração na largura de 7,2% e na espessura de 8,3%, valores acima dos encontrados nessa pesquisa, possivelmente pela maior quantidade de material lenhoso. Susin (2012) atingiu para valores de contração tangencial na espécie de *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus grandis* de 12,83% e 9,65%, e de espessura 7,92% e 5,54%, com fatores de anisotropia de 1,6 e 1,6, respectivamente. Coeficientes de anisotropia similares aos alcançados nesse estudo. De acordo com Nock, Richter e Burger (1975) valores abaixo de 1,5 de anisotropia são excelentes para a qualidade da madeira e Klitzke (2007) considera esse índice muito estável.

A contração ocorre em decorrência da retirada de água da parede celular da madeira, a diferença de comportamento anisotrópico pode gerar defeitos, que são acompanhados de gradientes de umidade e tensões de secagem (SANTINI, 1992). A contração também prediz qual será o volume final de madeira seca, o que é importante na logística e na industrialização do material.

## 5.5 VARIÁVEIS AMBIENTAIS NA SECAGEM SOLAR

### 5.5.1 Variáveis ambientais medidas dentro e fora da estufa solar

As médias das variáveis ambientais dentro da estufa solar e do ambiente estão apresentadas na Tabela 8. Observa-se que a diferença média de temperatura, umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio da madeira é de 8,1°C, 21,68 pontos percentuais e 5,62 pontos percentuais, respectivamente. A diferença máxima de temperatura foi de 22,26°C mostrando que o equipamento apresentou êxito em aumentar a energia fornecida para a secagem, pois essa diferença de temperatura aumenta a quantidade de calor, que é responsável pela retirada de água na madeira (CECH. PFAFF, 1977).

TABELA 8 – MÉDIAS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS INTERNAS E EXTERNAS A ESTUFA SOLAR (TEMPERATURA, UMIDADE RELATIVA DO AR E UMIDADE DE EQUILÍBRIO) NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

	Ti (°C)	Te (°C)	URi (%)	URe (%)	UEi (%)	UEe (%)
Média	26,64 A	18,47 B	63,61 a	85,29 b	8,05 Aa	13,67 Bb
Desvio	5,55	1,86	5,70	7,72	1,10	2,93
CV	20,82	10,07	8,96	9,05	13,66	21,46
Máximo	53,53	31,27	85,30	99,00	13,23	20,91
Mínimo	15,62	10,07	25,90	38,01	2,24	3,51

Nota – Letras maiúsculas diferentes demonstram diferença estatística (Tukey;  $p \leq 0,05$ ) entre as temperaturas internas e externas a estufa; Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística (Tukey;  $p \leq 0,05$ ) entre as umidades relativas do ar internas e externas a estufa; Letras maiúsculas seguidas de minúsculas diferentes demonstram diferença estatística (Tukey;  $p \leq 0,05$ ) entre as umidades de equilíbrio internas e externas a estufa; Ti: temperatura interna à estufa; Te: Temperatura externa à estufa; URi: Umidade relativa interna da estufa; URe: Umidade relativa externa da estufa; UEi Umidade de equilíbrio interna da estufa; UEe: Umidade de equilíbrio externa da estufa.

Santini (1981) nos primeiros dias de uma secagem solar obteve diferenças de temperaturas entre o exterior e interior variando em até 27°C e no final da secagem atingiu uma diferença de 44°C, no horário de pico de temperatura (às 14 horas). Stangerlin (2009) diferenciou a temperatura, umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio dentro de uma estufa solar diariamente no horário de 15 horas (pico de temperatura), em Santa Maria, no Rio grande Sul, tanto para a secagem acima do PSF quanto abaixo, obtendo resultados de 34°C e 36,5°C, 55% e 41,54%, 10% e 7,72%, respectivamente. O mesmo autor alcançou uma diferença de temperatura de média de 13,88°C, diferença de temperatura máxima de 27,8°C, diferença média umidade relativa de 2,84 pontos percentuais e diferença média de umidade de equilíbrio de 1,7 pontos percentuais.

Peck (1962) e Bois (1977) apresentaram diferenças de temperatura entre o ambiente e a estufa solar nos primeiros dias da secagem de 8,3°C e 5°C, e no final de 16,6°C e 11,1°C, respectivamente. Yang (1980) estudando a secagem solar obteve uma diferença entre as temperaturas interna e externa de 29°C, obtendo dentro da estufa 55°C e no ambiente externo 16°C. Gough (1977) e Cueto (1977) obtiveram em dias ensolarados valores máximos de diferença de temperatura entre 15°C e 20°C, e 18°C e 24°C, respectivamente, valores próximos ao encontrado nesta pesquisa. Moraes-Duzat et al.(2003) encontraram uma diferença de temperatura de 10°C em Manaus e Bauer (2002) uma diferença de 8°C , em Minas Gerais, com uma temperatura máxima atingida de 50°C.

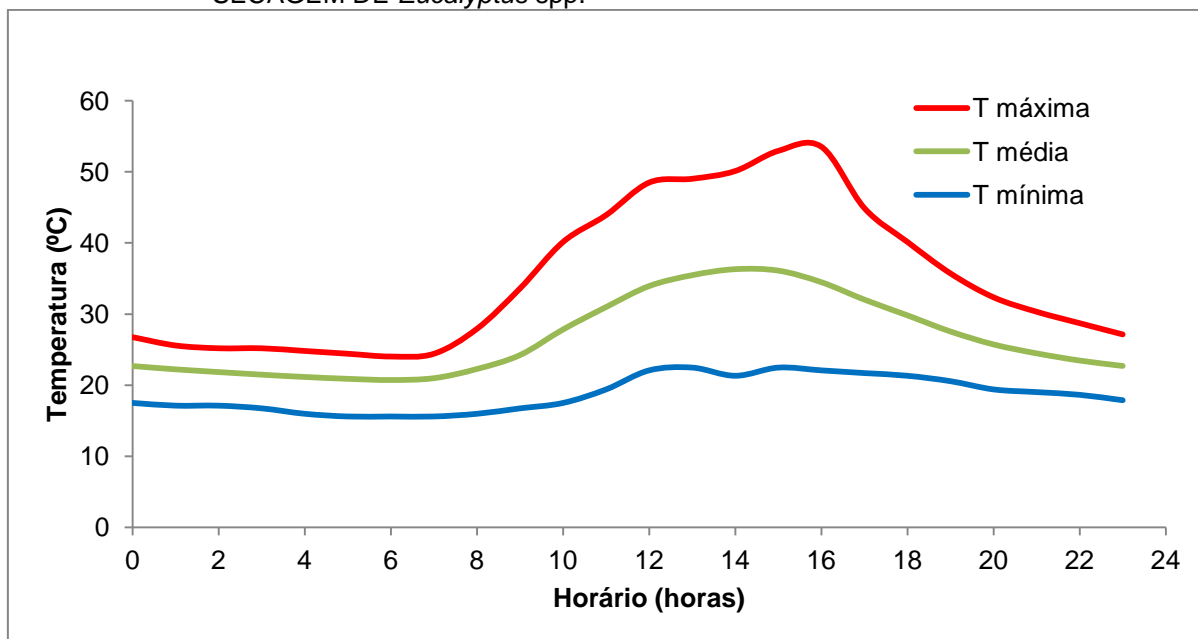


Ono et al. (2006) na secagem solar de *Eucalyptus grandis* encontraram uma temperatura máxima em setembro de 45,9°C, com uma diferença de temperatura média de 7,4°C. Ono e Ventorino (2006) encontraram uma temperatura média na estufa solar em outubro de 25°C e no ambiente externo de 15,3°C, uma umidade relativa de 74,4% internamente e 85,3% externamente, com valores máximos dentro da estufa de 54°C e 99% e externos de 33,5°C e 100%.

Observa-se que a temperatura dentro da estufa apresenta sempre uma média maior que a externa, e a umidade relativa do ar menor que a externa. Isso ocorre, pois com o aumento da temperatura, as moléculas ganham energia e o volume de ar se expande, contendo dessa maneira menor quantidade de moléculas de água num mesmo espaço, diminuindo a umidade relativa. A estufa solar durante o dia tem um considerável aumento no potencial de secagem, podendo ser superior em alguns momentos a secagem convencional, sendo que as temperaturas podem atingir 53,23°C e a umidade relativa 25,90%, a umidade de equilíbrio pode atingir 3,51% ocasionando um aumento na taxa de secagem, fato que pode causar defeitos na madeira.

Esse aumento no potencial de secagem por não ser controlado causa uma dificuldade na operação do equipamento, mas pode ser minimizado com injeção de água e abertura dos *dumpers*. Durante períodos noturnos ocorre um alívio nas tensões de secagem e na velocidade de secagem. A Figura 17 apresenta o comportamento da temperatura diariamente durante as secagens com a estufa solar (média, máximo e mínimo) e do ambiente externo a ela.

FIGURA 17 – COMPORTAMENTO DIÁRIO DA TEMPERATURA NA ESTUFA SOLAR (MÉDIA, MÁXIMO E MÍNIMO) E A TEMPERATURA MÉDIA DO AMBIENTE EXTERNO NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.



FONTE: O autor (2016)

É possível notar na Figura 17, que o comportamento da temperatura média, máxima, mínima e externa é similar diariamente, e o período de pico de temperatura está compreendido aproximadamente em 15 horas, na média, horário em que a radiação solar está próximo do vetor normal a estufa. Viehbeck (1999) comenta que as maiores temperaturas estão compreendidas entre 12 e 15 horas, dependendo da latitude do local.

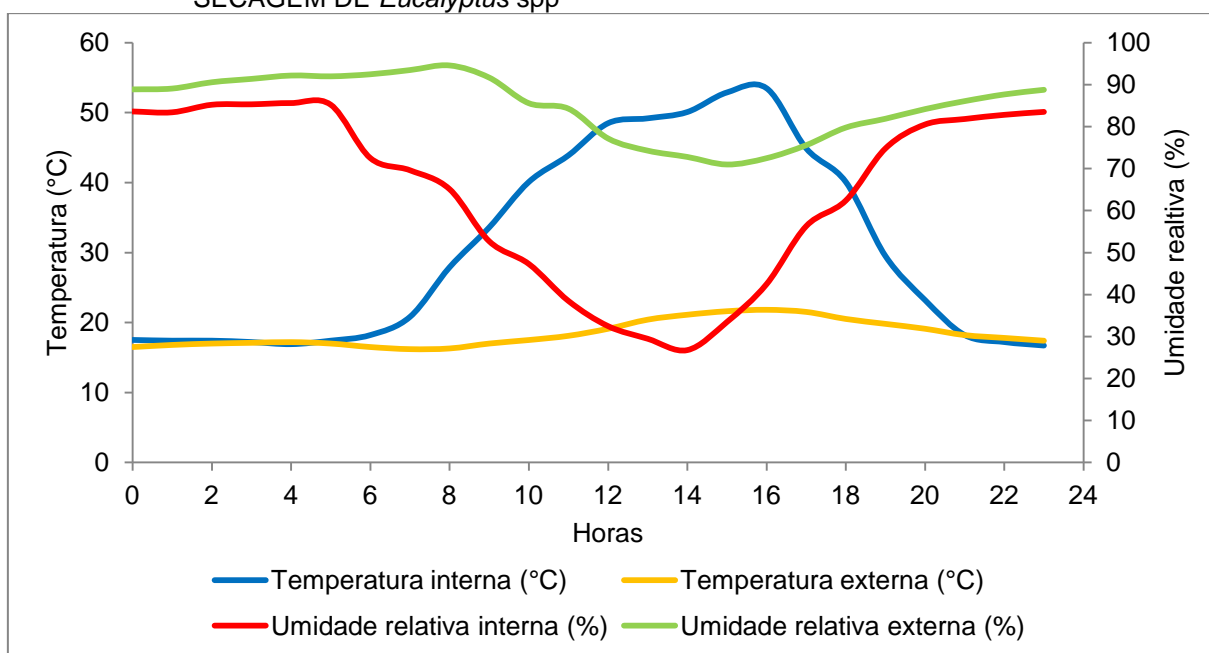
Esse comportamento polinomial foi observado por diversos autores, Santini (1981), Bauer (2002), Ono (2006), Ono e Ventorino (2006), Ono et al. (2006) e Stangerlin, sendo que no período da tarde ocorre um acúmulo de energia solar proveniente da radiação solar global, que é difundida dentro da estufa e vai sendo aumentado ao longo do dia. Isso ocorre, pois a camada de PVC funciona como um filtro de ondas longas, deixando passar em sua maioria as ondas ultravioletas, aumentando a temperatura dentro da estufa, e quanto maior for a radiação solar e as horas de insolação, maior pode ser a temperatura, até um determinado ponto. Mesmo sendo um protótipo de uso não industrial, os aspectos construtivos são de suma importância para um bom rendimento do equipamento e afetam esse bom desempenho do equipamento. Silva (2000) destaca que independente da

complexidade do protótipo utilizado, um sistema semi fechado vai sempre ter maior temperatura num secador solar que no ambiente aberto.

Alguns materiais poderiam aumentar a eficiência e consequentemente as temperaturas internas, como por exemplo, o material transparente seletor, um coletor externo (MENDES, 1985), mas aumentaria o custo do protótipo e, por conseguinte, fugiria dos objetivos de se utilizar um secador solar.

Outra variável fundamental para se entender a secagem em estufa solar é a umidade relativa do ar. A Figura 18 mostra a temperatura e a umidade relativa do ar dentro da estufa durante os dias de secagem e a temperatura e a umidade relativa do ar do ambiente externo.

FIGURA 18 – MÉDIA DA TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR; MÉDIA DE UMIDADE RELATIVA DO AR INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp



FONTE: O autor (2016)

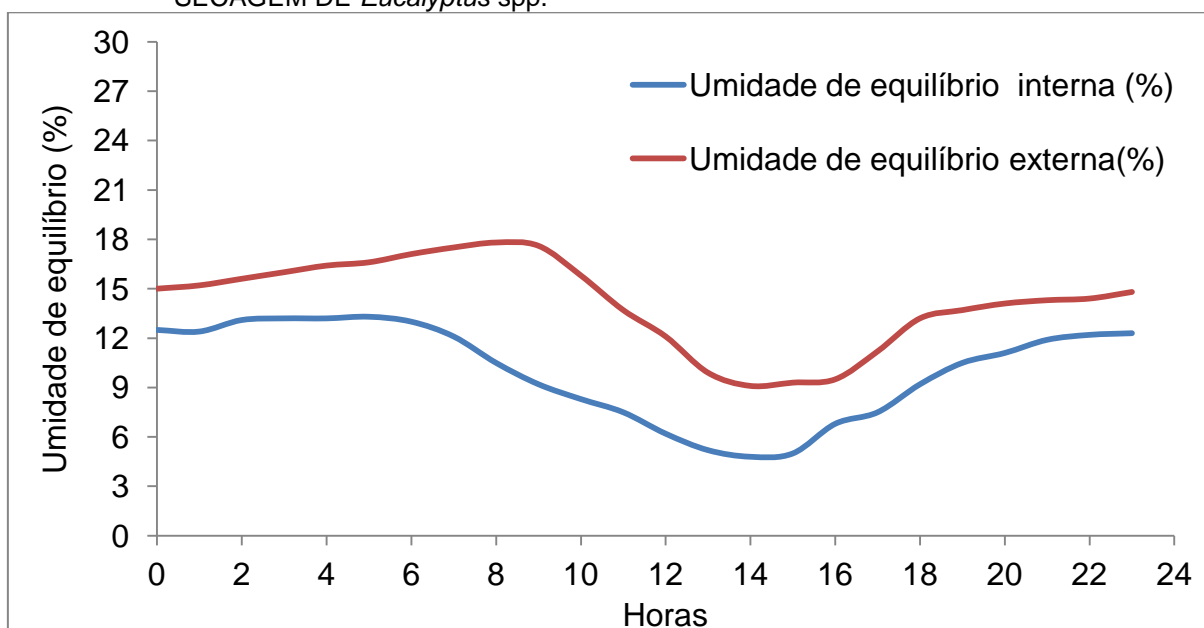
O comportamento da curva de umidade relativa do ar na Figura 18 é inverso ao da curva de temperatura, que nos horários de pico de temperatura a uma redução na umidade relativa, fato já relatado por diversos autores (SANTINI, 1981; BAUER, 2003; ONO, 2006; ONO, VENTORINO, 2006; STANGERLIN, 2009). Pode-se observar que os valores mínimos de umidade relativa são extremamente agressivos para a secagem, podendo ocasionar defeitos na madeira. Uma solução para esse problema seria colocar aspersores de água controlados para aumentar a

umidade relativa. Bauer (2003) e Stangerlin (2009) afirmam que no início da secagem como a umidade da madeira ainda é elevada e é fornecida para o ambiente, fazendo com que a umidade relativa do ar seja maior que no final da secagem, fato que foi desconsiderado nesse estudo, pela carga de madeira ser menor que a metade do volume da estufa solar.

A umidade relativa fora da estufa solar se apresentou em média maior que dentro dela, devido a temperatura interna ser maior em média, e o sistema ser semi fechado. Entretanto, Cueto (1997) encontrou valores maiores dentro da estufa do que fora, por outra via, Haque (2002) encontrou uma situação que corrobora com esse estudo.

Com os valores de temperatura e umidade relativa do ar é possível calcular a umidade de equilíbrio do ambiente, que é diretamente proporcional ao potencial de secagem. A Figura 19 demonstra o comportamento da umidade de equilíbrio da madeira dentro da estufa e a umidade de equilíbrio externo a ela.

FIGURA 19 – MÉDIA UMIDADE DE EQUILÍBRIO INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.



FONTE: O autor (2016)

A umidade de equilíbrio seguiu o que preconiza Santini (1981), Bauer (2003), Ono (2006), Ono e Ventrino (2006) e Stangerlin, sendo uma curva polinomial que tende a decair a medida que a temperatura sobe e a umidade relativa do ar desce. É possível observar que alguns valores mínimos podem chegar a aproximadamente

5%, se for considerado um valor no início da secagem (valores de umidade da madeira de 70% a 80%) o potencial de secagem será muito alto, ocasionando defeitos na madeira pela saída rápida de água. Essa falta de controle em uma estufa solar é a grande desvantagem em relação a convencional que possui um controle maior das variáveis.

#### 5.5.2. Radiação solar

A radiação solar também tem grande influência na secagem e quanto maior for ela, maior será a temperatura atingida (TROXELL e MUELLER, 1968; GOUGH, 1977; SANTINI, 1981; STANGERLIN, 2009). Na Tabela 9 são apresentados os dados de radiação solar média, acumulada até as 15 horas, total e a diferença de temperatura atingida na estufa.

TABELA 9 – RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA; RADIAÇÃO SOLAR ACUMULADA; RADIAÇÃO SOLAR TOTAL E DIFERENÇA DE TEMPERATURA NA ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

Variáveis	RS (KJ/m <sup>2</sup> )	RSA (KJ/m <sup>2</sup> )	RTA (KJ/m <sup>2</sup> )	DT (°C)
Média	517,38	7324,50	12417,17	8,10
Máxima	3785,00	14695,60	22414,07	31,77

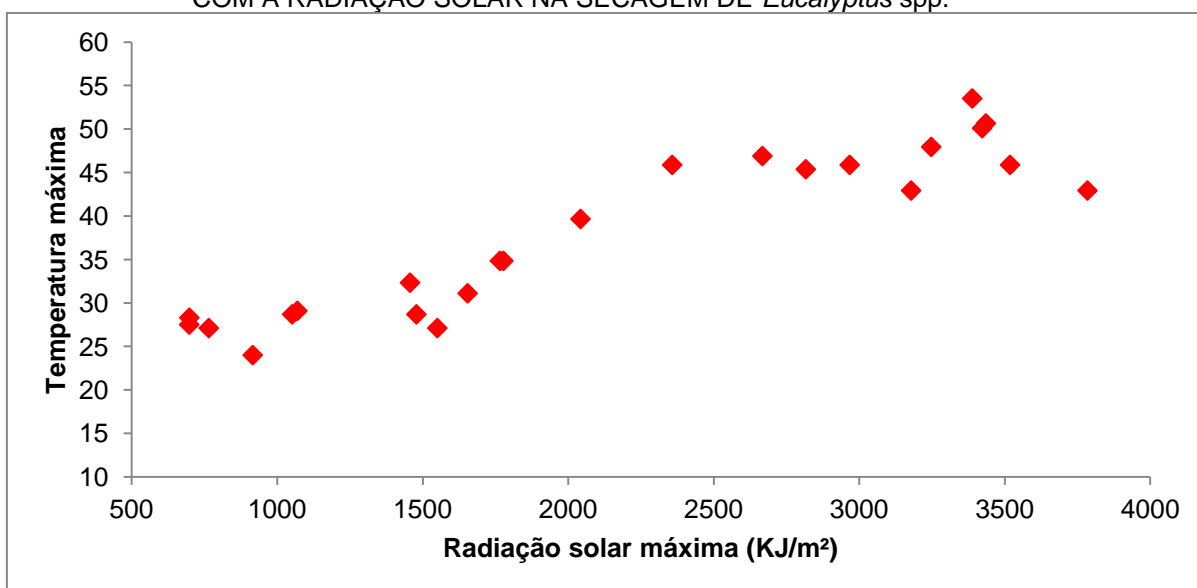
Nota- RS: Radiação solar; RSA: Radiação solar acumulada até às 15 horas; RTA: Radiação total acumulada durante o dia; DT: Diferença de temperatura entre a estufa solar e a temperatura ambiente.

A radiação solar para o processo de secagem solar é fundamental para se conseguir acelerar a velocidade de secagem de madeira e a construção de equipamento adequado para secagem é um fator preponderante no armazenamento dessa energia captada. Stangerlin (2009) obteve aproximadamente 3500 KJ/m<sup>2</sup> de radiação máxima diária, e 2000 KJ/m<sup>2</sup> de média, valores similares ao encontrado nesse estudo. Tiepolo (2015) cita que para os meses de setembro e outubro, os mesmos usados neste estudo, no estado do Paraná as médias foram maiores, 835 KJ/m<sup>2</sup> e 838 KJ/m<sup>2</sup>, e que os valores médios anuais são 58,75% maiores que os alcançados na Alemanha, um país que é exemplo no uso da Energia solar. Segundo Pereira et al. (2006), a energia que chega ao Paraná na média é de aproximadamente 750 KJ/m<sup>2</sup>, valores ligeiramente maiores, considerando o estado inteiro.

Segundo o Atlas Solarimétrico (2000) a energia que chega a Curitiba é aproximadamente 16000 KJ/m<sup>2</sup> por dia, valor que supera o valor desse estudo, que pode ter ocorrido, pois considera todas as épocas do ano.

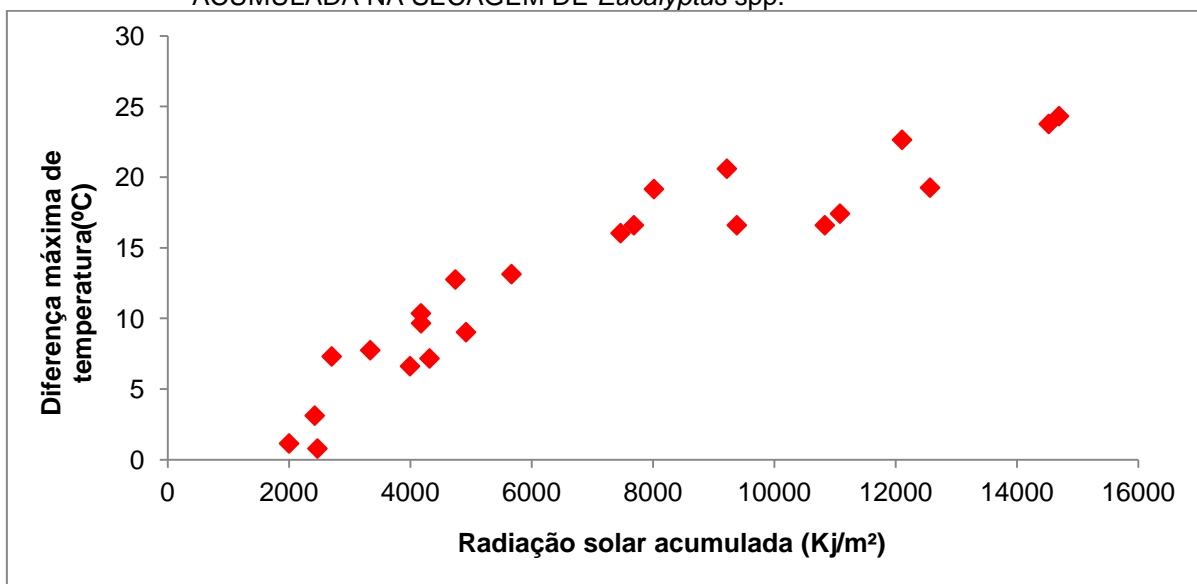
A Figura 20 demonstra o comportamento da radiação solar máxima durante o dia e qual a relação com a temperatura máxima atingida e a Figura 21 mostra qual a afinidade da radiação solar acumulada até às 15 horas com a diferença máxima na temperatura. Dessa maneira é possível observar a influência da radiação na temperatura.

FIGURA 20 – DISPERSÃO ENTRE A TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA NA SECAGEM SOLAR COM A RADIAÇÃO SOLAR NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.



FONTE: O autor (2016)

FIGURA 21 – DISPERSÃO ENTRE A DIFERENÇA MÁXIMA DE TEMPERATURA E A RADIAÇÃO ACUMULADA NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.



FONTE: O autor (2016)

As Figuras 20 e 21 corroboram para afirmar a influência da radiação solar na temperatura máxima e da radiação solar acumulada na diferença de temperatura máxima, respectivamente. Esses resultados estão de acordo com Bauer (2002) e Stangerlin (2009). Isso ocorre pelo motivo do PVC filtrar as ondas de menor energia (ondas longas) e deixar passar em maior parte as ondas de maior energia, dessa forma, quanto mais radiação solar incidir, maior a quantidade de energia, conseqüentemente, maiores temperaturas (HANSON, 1963). A Tabela 10 apresenta as regressões para as Figuras 20 e 21. Nos dois casos o melhor ajuste foi linear, atingindo um  $R^2_{aj}$  superior a 0,85.

TABELA 10 – EQUAÇÕES AJUSTADAS ENTRE A TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA NA SECAGEM SOLAR COM A RADIAÇÃO SOLAR E ENTRE A DIFERENÇA MÁXIMA DE TEMPERATURA E A RADIAÇÃO ACUMULADA NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

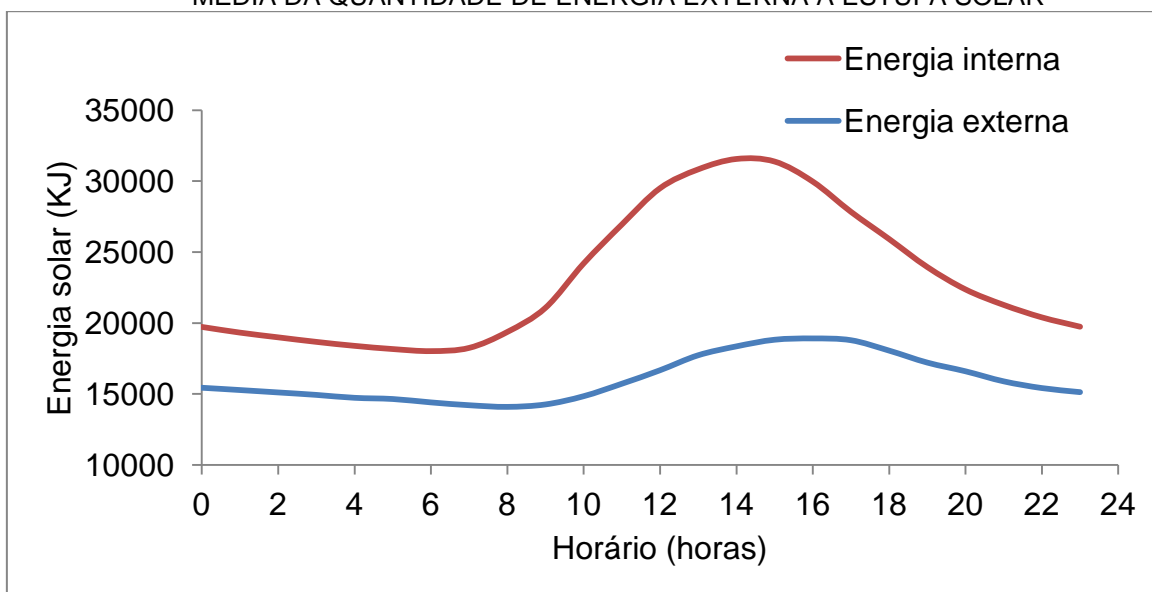
Regressão	Equação ajustada	$R^2_{aj}$	Syx	F
FIGURA 20	$TM = 0.0083 \cdot RS + 20,05$	0,86	3,58	133,20**
FIGURA 21	$DMT = 0.0016 \cdot RSA + 1,6178$	0,87	3.41	137,21**

Nota: TM: Temperatura máxima; RS: Radiação solar máxima; DTM: Diferença máxima de temperatura; RSA: Radiação solar acumulada até as 15 horas;  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro padrão da estimativa; F: fator de significância; \*\* nível de significância 1%.

Ono (2006) obteve um de  $R^2_{aj}$  0,81 para uma correlação entre a radiação solar e a diferença de temperatura. Dessa forma, é possível confirmar que a radiação contribuiu fortemente para o aumento de temperatura na estufa, ou seja, dias com pouca radiação solar, nublados, diminuirão o desempenho do protótipo. Nesse estudo não foi considerado as horas diárias de insolação, mas ela também esta relacionada as diferenças de temperatura (BAUER, 2003; STANGERLIN, 2009).

A quantidade de energia tem um comportamento variado durante o dia na estufa solar, com diferenças entre a energia externa e interna a ela num mesmo espaço (12,68 m<sup>3</sup>) são demonstrados na Figura 22. Observa-se que no mesmo período em que a diferença de temperatura é maior, visto anteriormente, a radiação foi maior, o que reforça essa interação entre as duas variáveis.

FIGURA 22 – MÉDIA DA QUANTIDADE DE ENERGIA RELATIVA INTERNA A ESTUFA SOLAR;  
MÉDIA DA QUANTIDADE DE ENERGIA EXTERNA A ESTUFA SOLAR



Nota: A radiação tanto interna quanto externa está representada em um espaço de 12,68 m<sup>3</sup> (volume da estufa solar). A quantidade de energia foi calculada a partir da temperatura de 0°C, e não em valores absolutos da escala Kelvin.

FONTE: O autor (2016)

A Figura 22 demonstra a quantidade de energia relativa a 0°C (considerando que a 0°C a energia é 0J e que com o aumento de temperatura a energia aumenta) a mais que a estufa contém durante o dia, realizando a integral das funções polinomiais das duas curvas da ilustração e subtraindo-as. As equações polinomiais da quantidade de energia relativa a 0°C e suas respectivas integrais estão representadas na Tabela 11.

TABELA 11 – EQUAÇÕES POLINOMIAIS DA QUANTIDADE RELATIVA DE ENERGIA INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR

	Equações polinomiais arredondadas	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup>
Qri	$-0,01*t^6 + 0,67*t^5 - 21,56*t^4 + 298,81*t^3 - 1628,3*t^2 + 2598,9*t + 19007$	0,98
∫ Qri	$∫ f(t)dt = -0,001*t^7 + 0,11*t^6 - 4,31*t^5 + 74,70*t^4 - 542,77*t^3 + 1299,45*t^2 + 19007*t + C$	0,98
Qre	$y = 0,003t^6 - 0,15t^5 + 1,9t^4 + 3,70t^3 - 131,92t^2 + 227,65t + 15308$	0,98
∫ Qre	$∫ f(t)dt = 4,43t^{10^{-4}}t^7 - 0,025*t^6 + 0,38*t^5 + 0,93*t^4 - 43,97*t^3 + 113,83*t^2 + 15308*t + C$	0,98

Nota – Qri: Quantidade de energia relativa interna a estufa; Qre: Quantidade de energia relativa externa a estufa; t: horário durante o dia; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinação ajustado; C: Constante da integral.

A energia total relativa num mesmo volume da estufa solar (16,28 m<sup>3</sup>) durante o dia é de 553527 KJ e externa a ela de 384054 KJ, resultando numa diferença de



169473 KJ. Considerando que essa energia térmica não tem custos, no período da secagem solar (31 dias), foram economizados 5253 MJ.

## 5.6 EFICIÊNCIA TÉRMICA DA ESTUFA SOLAR

Com as diferenças de temperatura, e com a radiação que chega no equipamento é possível calcular o rendimento, ou eficiência térmica do sistema de aquecimento. A Tabela 12 apresenta os resultados do rendimento médio da estufa.

TABELA 12 – EFICIÊNCIA TÉRMICA MÉDIA DA ESTUFA SOLAR NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

EFICIÊNCIA DIÁRIA ATÉ ÀS 15 HORAS				
Média (%)	DP	CV (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
24,19	8,58	35,46	42,50	4,12
EFICIÊNCIA MÉDIA DIÁRIA				
Média (%)	DP	CV (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
13,96	4,37	31,32	20,23	2,39

Nota- DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; A Eficiência média diária considera a energia total que chega a estufa.

A Tabela 12 apresenta uma eficiência média diária em torno de 14%, valor próximo ao encontrado por outros autores que analisaram a eficiência térmica de estufa solar para secagem de madeira. A eficiência do processo poderia ser aumentada melhorando o sistema de isolamento empregado na estufa. Quando analisamos a eficiência somente até as 15 horas encontramos uma eficiência média em torno de 24%, valor bem superior mas que não considera a redução da radiação a partir desse horário e não considera o período da noite que irá causar uma perda grande da energia térmica armazenada.

Mendes (1985) fez um estudo com um coletor solar externo parabólico para a secagem convencional de madeira serrada e atingiu uma eficiência térmica de 16,3%. Coimbra et al. (2008) para um coletor solar de baixo custo, no aquecimento de água encontrou uma eficiência de 11,89%. Guerra e Varela (2014) em um coletor para aquecer água, obtiveram entre 14,71% e 15,34%. Valores similares aos alcançados nesse estudo. Porém, Lopo (2010) em um sistema de baixo custo conseguiu eficiências entre 18,5% e 25,3%, resultado que corrobora com a eficiência do coletor da estufa solar até o horário de 15 horas.

Em outros estudos, não voltados para asecagem de madeira, Nagaoka et al. (2005), fez um coletor reciclado que alcançou um rendimento entre 37% e 67%. Goerch (2008) e Neves (2013) com coletores de alto custo apresentaram 51% e 43%, respectivamente. Siqueira (2009) realizou um estudo com um coletor de baixo custo e conseguiu atingir 41,9% de rendimento com o material de PVC. Valores esses mais próximos do rendimento máximo alcançado na estufa, para um dia de grande incidência de radiação solar. Peraneiro et al. (2011) relatou que a eficiência térmica está diretamente relacionada com a radiação solar, dessa forma, diferenças de temperaturas maiores entre o ambiente e a estufa, atingirão melhores rendimentos.

É notável que o rendimento obtido por vários autores é bem variado, isso é decorrente do fato de cada coletor possuir suas particularidades, como por exemplo a quantidade de massa que ele precisará aquecer, a superfície de absorção, o fluido que será aquecido, o fluxo de massa para distribuição. Guerra e Varela (2014) afirmam que coletores usuais podem atingir até 35% de rendimento, enquanto que os convencionais de alto custo podem alcançar 55%. Mesmo um equipamento similar ao deste estudo, mas com elementos construtivos diferentes, a carga de madeira usada, tamanhos diferentes do protótipo, seria de difícil comparação, principalmente porque a transferência de calor e massa não é linear com o aumento do espaço de trabalho. Dessa forma, mesmo sem ser no verão o equipamento atingiu rendimentos bons para esse tipo de método.

## 5.7 EFICIÊNCIA DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS PLANAS

A Tabela 13 apresenta os dados da potência recebida pelas placas fotovoltaicas, a potência que elas geram e a eficiência. É importante ressaltar que o valor da eficiência foi maior que o estabelecido para o dimensionamento das placas na análise de viabilidade na secagem solar, que foi 13%, dessa forma a análise se torna confiável, com uma margem 0.75% de sobra energética. Outro fator importante que deve ser considerado é a diferença entre KJ, que é a unidade usada para energia nos cálculos térmicos, e KWh que é mais usada para energia elétrica e eficiência fotovoltaica.

TABELA 13 – EFICIÊNCIA ELÉTRICA DAS PLACAS PLANAS FOTOVOLTAICAS PLANAS

	Energia recebida (KWh)	Energia gerada (KWh)	Eficiência (%)
Média	1656,07	218,50	13,75
DP	409,49	47,03	4,21
CV(%)	24,73	21,53	30,59
Máximo	2075,34	253,40	21,00
Mínimo	854,77	117,00	8,00

Nota: KWh: Kilowatt-hora; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de variação (%).

Moraes-Duzat (2002) aferindo o uso de placas fotovoltaicas na secagem solar em Manaus obteve 9,5% de eficiência média, e 15% de pico. Calderón et al.(2000) atingiu na Espanha 8,39 com um painel monocristalino. Ambos os resultados abaixo do alcançado nesse estudo, no primeiro caso, pela eficiência nominal ser abaixo dos painéis utilizados nessa pesquisa, no segundo caso, possivelmente porque o Brasil em média tem um maior potencial energético fotovoltaico que a Espanha. Marinowski, Salamoni e Ruther (2004) obtiveram uma eficiência de 13,5% e 13,2%, Teixeira (2011) alcançou 12,5%, resultados semelhantes a esse estudo.

Para Urbanetz Junior (2014) a eficiência de um painel policristalino esta entre 11% e 14% e afirma que a energia média mensal recebida na região de Curitiba é em média 1581 KWh, valor muito próximo a esse estudo, mas pode chegar até a 5315 KWh. Para Niedzialkoski (2013) a eficiência de um painel policristalino deve ser de 13%, mas em Cascavel, Paraná, atingiu apenas 5,6%.

Cogen (2012) relata que o Brasil ainda está defasado no uso desses tipos de sistemas, e que ainda o custo é elevado, entretanto, tecnologias vêm sendo melhoradas e a tendência é com o aumento da eficiência dos painéis o uso possa ser aumentado. Os painéis de silício policristalino possui uma grande vantagem em relação ao monocristalino, que é não gastar tanta energia na produção dos cristais, dessa maneira, tem menos impacto ambiental e menor custo.

## 5.8 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE MADEIRA NOS DIFERENTES MÉTODOS

### 5.8.1. Gradiente de umidade e tensões de secagem

Os valores médios de gradiente de umidade e tensões de secagem estão presentes na Tabela 14. Percebe-se não haver diferença estatística no gradiente de

umidade nos métodos de secagem estudado, sendo considerados baixo. A forte dispersão dos dados demonstram baixa precisão nos resultados.

TABELA 14 – TEOR DE UMIDADE FINAL; GRADIENTE DE UMIDADE; TENSÕES NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

Método	Gradiente (%)	Tensões (%)		
		Ausente	Leve	Forte
Secagem Solar	0,58 A (0,41; 71,53)	20	67	13
Secagem Convencional	0,67 A (0,35; 52,41)	0	53	47

Nota: Entre parênteses estão os valores de desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente; Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Para o gradiente de umidade Batista (2009) apresentou valores de 0,50 a 0,62 para o *Eucalyptus saligna* e 0,49 a 0,58 para o *Eucalyptus grandis*, Mellado (1993) obteve um valor de 0,6. Os dois autores obtiveram resultados parecidos com dessa pesquisa, no entanto, Susin (2012) com uma madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus robusta* obteve um maior gradiente de umidade 1,26 e 4,16, provavelmente ocorrido pelo motivo delas terem uma maior massa específica. O gradiente de umidade é de fundamental importância para a retirada de água da madeira (KLITZKE, 2007), entretanto, as etapas de finalização, como uniformização e acondicionamento podem minimizar esse efeito.

Mesmo não havendo diferença estatística entre os gradientes da estufa solar e da convencional, a primeira possui 13% a menos de diferença de umidade nas extremidades. O fato pode ser explicado pelos períodos noturnos da secagem solar, quando há uma queda de temperatura, e aumento da umidade relativa do ar, fazendo com que haja uma uniformização na carga.

As tensões de secagem foram mais presentes na secagem convencional, onde 100% das peças estão tensionadas, no entanto, Santos (2002) apresentou valores um pouco inferiores para a secagem convencional de 85% das peças. Batista (2009) obteve para o *Eucalyptus saligna* 88,89% de tensão leve e 3,70 de tensão forte e para o *Eucalyptus robusta* 81,46% de tensão leve e 0% de tensão forte. O fato de a secagem convencional apresentar todas as peças com tensão nesse estudo pode estar relacionado ao baixo tempo de secagem que a madeira ficou submetida.

### 5.8.2 Defeitos de secagem

#### a) Arqueamento

Os Valores para o arqueamento nas metodologias de secagem adotadas estão apresentados na Tabela 15. Observa-se que houve aumento em todos os casos no percentual desse defeito, sendo que a diferença entre a secagem solar e a secagem convencional foi de 6 pontos percentuais. Vale ressaltar que as peças consideradas defeituosas possuem o índice de encurvamento e arqueamento superior a 5 mm/m.

TABELA 15 – ARQUEAMENTO DA MADEIRA NA SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp.

Método	Antes da secagem		Depois da secagem		Diferença IA (mm/m)
	IA (mm/m)	(%)	IA (mm/m)	(%)	
Secagem Solar	2,32	0	3,01	9	0,69 A
Secagem convencional	0,60	0	1,75	15	1,15 A

Nota – IA: Índice arqueamento. Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

A secagem convencional resultou em maior porcentagem de peças consideradas defeituosas e maiores diferenças no índice de arqueamento. No entanto, não houve diferença estatística entre as metodologias. Esse defeito é originado pela diferença de contração longitudinal entre as laterais das tábuas podendo ser causado pela diferença de lenhos (juvenil e adulto) na mesma peça, visto que os mesmos apresentam comportamentos distintos quanto a contrações durante a secagem (SUSIN, 2012). As tensões de crescimento nas peças também podem ser primordiais para o arqueamento (MATOS et al., 2003).

Os resultados da diferença entre os índices são maiores que os obtidos por Stangerlin (2009) e Susin (2012). Por outra via, Rocha e Tomaselli (2002), Rocha e Trugilho (2006) e Souza et al. (2015) não encontraram diferenças no arqueamento após a secagem. Tendo em vista que os índices após a secagem são maiores que os de antes dela, pode-se dizer que o processo de retirada de água teve maior influência que o desdobro.

## b) Encurvamento

Os valores para o encurvamento nas metodologias de secagem adotadas estão apresentados na Tabela 16. Nota-se que a porcentagem de peças defeituosas aumentou significativamente após a secagem, mas os métodos não apresentaram diferenças significativas estatisticamente para esse defeito.

TABELA 16 – ENCURVAMENTO DA MADEIRA NA SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp.

Método	Antes da secagem		Depois da secagem		Diferença IE (m/mm)
	IEc (mm/m)	(%)	IEc (mm/m)	(%)	
Secagem Solar	4,91	15	5,3	54	0,39 A
Secagem convencional	3,45	12	4,38	27	0,93 A

Nota- IEC: Índice de encurvamento. Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

A secagem solar teve a maior porcentagem de peças consideradas defeituosas, com um aumento de 39 pontos percentuais após a secagem, todavia, isso pode ser explicado pelo alto índice de encurvamento apresentado mesmo antes da secagem, dessa forma a diferença absoluta antes da secagem e após não é diferente das obtidas nas outras metodologias.

Na secagem convencional e solar as tábuas já apresentavam um grande índice de encurvamento, prejudicando a qualidade final das peças. Mas a diferença entre os índices após a secagem não foram elevados, assim como os valores encontrados por Rosso (2006), Stangerlin (2009), Susin (2012). Mesmo não havendo diferença estatística, a diferença total do índice de encurvamento na secagem convencional foi maior, por haver uma maior velocidade na secagem.

Santos (2002) obteve um aumento de aproximadamente 34 pontos percentuais no encurvamento em uma secagem convencional, valor muito acima do encontrado nesse estudo, ao passo que antes de uma pré-secagem até uma secagem convencional teve um aumento de 5,8 pontos percentuais. Rocha (2000) diferentemente dessa pesquisa obteve uma redução no encurvamento após a secagem.

O encurvamento é decorrente das retrações que ocorrem na madeira em razão da secagem mais acelerada em uma face frente a outra, sendo assim, como a madeira é anisotrópica há sempre uma chance de haver encurvamento (BRANDÃO,

1989). Esse defeito não é um dos mais agudos na secagem, pois ele pode ser minimizado no empilhamento (SIMPSON, 1991; DENIG et al. , 2000). As tensão de crescimento também ocasionam os empenamentos (MATOS et al., 2003).

#### c) Encanoamento

Os valores para o encanoamento obtidos na secagem estão apresentados na Tabela 17. Nota-se que somente na secagem convencional houve peças consideradas defeituosas após a secagem. Valores acima de 4 mm/m, foram classificadas como defeituosas.

TABELA 17 – ENCANOAMENTO DA MADEIRA NA SECAGEM SOLAR E SECAGEM CONVENCIONAL DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp.

Método	Antes da secagem		Depois da secagem		Diferença (mm/m)
	IEn (mm/m)	(%)	IEn (mm/m)	(%)	
Secagem Solar	0	0	1,15	0	1,15 A
Secagem convencional	0	0	1,14	3	1,14 A

Nota- IEn: Índice de encanoamento. Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Esse resultado pode ser explicado pela largura das tábuas ser relativamente baixa (10 cm) e pelo coeficiente de anisotropia ser relativamente baixo. Galvão e Jankowsky (1985), Simpson (1991) afirmam que o encanoamento pode ser resultante da diferença entre as retrações transversais da madeira, bem como, da exposição de apenas uma face da tábua a secagem.

O percentual de peças consideradas defeituosas está muito abaixo de vários autores Mellado (1993), Severo (2000), Batista (2009), Batista et al. (2012). E a diferença corrobora com Susin (2012).

#### d) Colapso

Com relação ao colapso, houve apenas uma peça que apresentou esse defeito e foi após a secagem convencional, mostrando que a recuperação do colapso obteve êxito, assim como Mellado (1993), Severo (2000) e Stangerlin (2009). Ponce (1995) afirma que eucaliptos de média densidade são mais propícios ao colapso, demonstrando que os resultados desse estudo são satisfatórios. Outros

autores que não usaram a recuperação de vaporização, Santos (2002), Batista (2009), Batista et al. (2012) e Susin (2012), tiveram incidência desse defeito.

O colapso é uma forma de contração anormal e irregular, que acontece durante a retirada da água capilar, ocasionando uma deformação interna das células (KOLLMANN e CÔTÈ, 1968; SANTINI, 1992). Conforme Jankowsky (1995), a principal causa do colapso é a tensão capilar, que ocorre nas fases iniciais de secagem, dessa forma, o programa utilizado nesse estudo mostrou-se eficiente. Esse defeito é um dos mais agravantes e dificulta o uso da madeira, inutilizando-a para muitos fins.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

a) Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- O teor de umidade final na estufa solar (11,88%) foi próximo a estufa convencional (9,92%) e de grande aplicação no mercado;
- A estufa solar apresentou um ganho energético de 169473 KJ em relação ao ambiente diariamente, economizando 5253MJ durante toda a secagem;
- A estufa solar apresentou uma eficiência térmica diária de 13,96% e eficiência térmica diária até às 15 horas de 24,19%;
- As placas fotovoltaicas atenderam a eficiência necessária para sua aplicação na estufa solar, apresentando viabilidade técnica;
- A secagem solar apresentou um tempo quatro vezes maior de secagem que a secagem convencional;
- A taxa de secagem na estufa solar foi duas vezes menor que a secagem convencional acima de 32% de teor de umidade da madeira e cinco vezes menor abaixo de 32% de umidade da madeira;
- O ponto crítico na secagem solar ocorreu aproximadamente às 15 horas, quando a temperatura é mais elevada e a umidade relativa do ar é menor, resultando em um alto potencial de secagem;
- A radiação solar apresentou um alto coeficiente de determinação ajustado com a temperatura na estufa solar, acima de 0,86;
- Não houve significativa diferença na qualidade final da madeira entre a secagem solar e a secagem convencional, porém a secagem convencional demonstrou maior incidência de tensões e empenamentos;
- A Estufa solar mostrou-se ser uma boa alternativa para a secagem de madeira serrada;

b) Recomenda-se em estudos posteriores:

- Utilizar cargas maiores de madeira dentro da estufa solar e avaliar o rendimento térmico do equipamento;

- Aplicar diretamente o sistema fotovoltaico no ventilador da estufa solar e reiterar o que foi concluído nesse estudo;
- Mudar o local dos *dumpers*, pois aquele localizado na saída de ar da estufa não possui boa operacionalidade e prejudica a velocidade do vento;
- Considerar a possibilidade de aumentar a eficiência energética, bem como o tempo de temperaturas mais elevadas dentro da estufa solar, utilizando um coletor solar externo e melhorar o isolamento utilizando paredes mais espessas e melhor vedadas;
- Verificar a viabilidade econômica das placas fotovoltaicas;

## REFERENCIAS

ALZATE, A.; BIBIANA, S. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. Grandis x urophylla***. 133 f. Tese (Doutorado) - Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira - Rio de Janeiro, 1997. 107p.

ATLAS Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos /coordenador Chigueru Tiba... et al. Recife : Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. : il., tab., mapas.

BAENA, E.S. **A utilização de *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus grandis* Hill jovens na confecção de sarrafos**. Piracicaba. 74 p. Tese. (Mestrado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, 1982.

BANDEIRA, F. De P. M. **Aproveitamento da energia solar no Brasil: Aproveitamento e perspectivas**. Disponível em <[http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/9008/aproveitamento\\_energia\\_bandeira.pdf?s=equence](http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/9008/aproveitamento_energia_bandeira.pdf?s=equence)>. Acesso em: 26/12/2012.

BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero *Eucalyptus***. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BATISTA, D. C. ; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus* sp.** Ciência Florestal (UFSC), v. 25, 2015. p. 711-719.

BAUER, K. **Development and optimisation of a low-temperature drying schedule for *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden in a solar-assisted timber dryer**. 178f. Tese (Doutorado em Ciencias Agrarias) – Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim, Hohenheim, 2003.

BLUHM, E.; KAUMAN, W.G. **El colapso en la madera y su reacondicionamiento**. Informe Técnico, n.22, Chile, 1965. p.1-23.

BOIS, P.J. **Constructing and operating a small solar-heated lumber dryer**. Madison: Forest Products Utilization: Technical Report n. 7. USDA Forest Service, 1977. 12 p.

BOLAND, D. J.; BROOKER, M. I. H.; CHIPPENDALE, G. M.; HALL, N.; HYLAND, B. P. M.; JOHNSTON, R. D.; KLEINING, D. A.; MCDONALD, M. W.; TURNER, J. D. **Forest trees of Austrália**. 5 ed. Colingwood: Csiro, 2006.

BRAMHALL, G.; WELLWOOD, R. W. **Kiln drying of western Canadian lumber**. Vancouver: Western Forest Products Laboratory, 1976. 112p.

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de Metodologia para a Indicação de Programas de Secagem de Madeiras**. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BRASIL. **Norma para classificação de madeira serrada de folhosas**. Brasília: Ministerio da Agricultura, IBDF, Laboratorio de Produtos Florestais, 1983. 67 p.

BRAZ, R. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; RODRIGUES, B. P.; ARANTES, M. D. C. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, Curitiba, v. 43, 2013. p. 663-670.

BROWN, N.C.; PANSIN, A.J.; FORSAITH, C.C. **Textbook of wood technology**. London. McGraw-Hill, 1952. v.2. 783p.

CAVALCANTE, A.A. **Ocorrência do colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna***. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CARDENAS, P.; CASTRO, R.; ONO, A.; VENTURINO, A. **Secado solar en invierno de *Eucalyptus grandis***. Nota Técnica n11. 10p. Montevideo: LATU – Departamento de Proyectos Forestales, 2005.

CECH, M.Y.; PFAFF, F. **Kiln operator's manual of Eastern Canada**. Ontario: Eastern Forest Products Laboratory, 1977. 189 p.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESEB, 1999.

CHEN, P.Y.S.; ROSEN, H.N. **Drying yellow-poplar in a highly efficient solar kiln**. In: 30<sup>th</sup> Annual Western Dry Kiln Clubs. Proceedings... 1979. p. 23-32.

CHUDNOFF, M. MALDONADO. GOYTÍA. **Solar drying of tropical hardwoods**. USDA: Forest Service Institute of Tropical Forestry Research, Paper ITF-2. (Puerto Rico), 1966. 26 p.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola 216 Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

COIMBRA, N.; AZAMBUJA, C.; DALMAS, T.; COELHO, L. **Eficiência Térmica de Coletor Solar de Baixo Custo**. (Trabalho de conclusão de Medições Térmicas) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

COGEN. **GT COGEN SOLAR**: “Inserção da Energia Solar no Brasil”. São Paulo: 2012. Disponível em: <[http://www.cogen.com.br/Solar/Biblioteca\\_Virtual/Relatorio\\_Final\\_GT\\_COGEN\\_SOLAR.pdf](http://www.cogen.com.br/Solar/Biblioteca_Virtual/Relatorio_Final_GT_COGEN_SOLAR.pdf)>.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 461**: Determinación del peso específico aparente. 1972. 8p.

COMSTOCK. **Energy requirements for drying of wood products. Madison proceedings wood residue as na Energy source**. Forest Products Research Society, 1975.

COSTA, A. **Anatomia da madeira**. Coletâneas de Anatomia da Madeira, 2001. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/APOSTILANATOMIA1.pdf>> . Acesso em 14/01/2011.

CUETO, E.M.P. Diseño y ensayo de un secador solar para madera. **Madera y Bosques**, v. 3, n. 2, 1997. p. 13-28.

DENIG, J.; WENGERT, E.M.; SIMPSON, W.T. **Drying hardwood lumber**. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000.138 p.

DESCH, H.E.; DINWOODIE, J.M. **Timber: structure, properties, conversion and use. 7 ed**. London: Macmillan Press Ltd., 1996. 306p.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 2ª ed. Wisconsin: John Wiley & Sons, 1991.

FERREIRA, M. **Escolha de Espécies de Eucalipto**. Circular Técnica IPEF, v.47, p.1-30, 1979.

FREIRE, L. B. C. **Metodo para levantamento do potencial energético solar em campus universitário**. 67f. Trabalho de Graduação (Título de Engenharia Eletricista) - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

FRIGOTTO, T.; MAZZO, M. V.; NAVROSKI, M. C.; PEREIRA, M. O.; SOUZA, P. F. **Seleção de procedências de *Eucalyptus smithii* na região norte de Santa Catarina.** In: III Congresso Brasileiro de Eucalipto. Vitória: 2015.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira.** São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

GOERCK, M. **Determinação do potencial energético de um coletor solar foto térmico na região do vale do Taquari – RS Brasil.** 92f. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2008.

GOMES, D. F. F.; SILVA, J. R. M.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F. Avaliação da estabilidade dimensional da madeira acetilada de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Scientia Forestalis.** Piracicaba, n. 70, 2006. p.125 - 130.

GOUGH, D.K. Timber seasoning in a solar kiln. 6p. **Technical paper**, n. 24. Department of Forestry, Queensland, 1981.

GUERRA, M. I. S. VARELLA. F. K. O. M. **Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró (RN).** Ano 30, Vol.4. Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Mossoro, 2014.

HAIL, G.S.; HOOKS, R.A; PLUMRIDGE, R.J. **The art of timber drying with solar kilns.** Unido ID/WG. 338/1, 1981.

HANSON, J.K. **The radiation effectiveness of plastic films for Green-House.** In: **Jour.** Appl. Meteor. 2(7) 793- 7, 1963.

HAQUE, M.N. **Modelling of solar kilns and the development of an optimised schedule for drying hardwood timber.** 354f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – University of Sidney, Sidney, 2002.

HART, C. A. **The drying of wood.** Raleigh: North Caroline Agricultural Extension Service, 1966. 24 p.

HATTON, T.A. **Energy requeriments for the drying of wood:** a theoretical treatment. In: South African, Council for Scientific and Industrial Research – Special Report Hout 54. P.O. Box 395, Pretoria. 1973.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber.** Germany: Maschinenbau GmbH, 1970. 199p.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Normas de procedimentos em estados de anatomia de madeira. **Série Técnica nº 15.** Brasília: 1991. 19p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. ***Eucalipto-grandis***. São Paulo: IPT, 1997. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=13](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=13)>. Acesso em 02/08/2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. ***Eucalipto-saligna***. São Paulo: IPT, 1989. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=13](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=13)>. Acesso em 02/08/2015.

IPT / SUDAM. **Estudo sobre métodos de secagem de madeiras da Amazônia**. Belem: SUDAM, 1981. 77p.

JANKOWSKY, I. P. **Equipamentos e processos para secagem de madeiras**. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. 109-118p.

JOHNSON, D.D. **Timber drying - the principles involved**. J. Inst. Wood Sei. 5(2):3-8, 1970.

JOHNSON, C.L. **Wind-powered solar-heated lumber dryer**. Southern Lumberman, v. 203, n. 2532, 1961. p. 41-44.

KEEY, R. B; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. **Kiln-drying of lumber**. Berlin: Springer Verlag, 2000. 326p.

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. In: José Tarcísio da Silva Oliveira, Nilton César Fiedler, Marcelo Nogueira. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2007, v.1, p. 271-366.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeiras**. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 38, n. 85, 2010. p. 97-105.

KOCH, P. **Process for Straightening And Drying Southern Pine 2 by 4's in 24 Hours**. For. Prod. J.. 21(5): 17-24, 1971.

KOLLMANN, F. E. P. **Tecnologia de la madeira e sus aplicaciones**, v. 2, Madrid, 1959. 675 p.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTE JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. 592p.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: EDUSP, 1996.

LOIOLA, P. L. **Secagem da madeira teca (*Tectona grandis* L. f) sob diferentes condições**. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

LOIOLA, L. P., JUIZO, G. F. J., MARCHESAN, R., KLITZKE, R. J., ROCHA M. P. **Drying of Wood from Mimosa scabrella, *Eucalyptus dunnii* and *Tectona grandis* in Solar Kiln, in South Brazil**. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 9(5) March 2015, P. 445-453.

LOPO, A. B. **Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo**. 81f. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

LUMLEY, T.G.; CHOONG, E.T. Solar drying of wood in Louisiana. 55p. **Agricultural Experiment Station Bulletin**, n. 732. Louisiana State University (Baton Rouge), 1981.

MACKAY, J.F.G. **Influence of steaming on water vapor diffusion in hardwoods, *Wood Sci.***, v.3, 1971. p.156-160.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of Timber**. North Vancouver, British Columbia. Canada: Timber Engineering Ltda, 1992. 437p.

MALDONADO, E.D.; PECK, E.C. **Drying by solar radiation in Puerto Rico**. Forest Products Journal, v. 12, n. 10, 1962. p. 487-488.

MARINOSKI, D. V.; SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. **Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC**. In: I Conferência Latino-Americana de construção sustentável X Encontro Nacional de tecnologia do ambiente construído. Proceedings...18-21 julho 2004, São Paulo: ISBN 85-89478-08-4. 14 p.

MARTINS, V.A. **Secagem de Madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 56p.

McMILLEN, J.M. & WENGERT, E.M. **Drying eastern hardwood lumber**. Madison: USDA For. Prod. Lab., 1978. 104 p.

MELLADO, E. C. E. R. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Curso de Pós graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1993.



MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MELO, J. R. **Secagem de madeiras**: teoria e prática de secagem artificial de madeiras. Lisboa: Estação Florestal Nacional, 1999.

MENDES, A.S. **Utilização de coletor solar parabólico na secagem da madeira**. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1985.

MENDES, L. M. **Movimentação de água abaixo do ponto de saturação das fibras**. 63f. Não publicado (Trabalho apresentado ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

MORAES-DUZAT, R.; BARBOSA, A.P.; VETTER, R. **O secador solar do INPA**: uma alternativa econômica para secar madeira. In: 3o ENC. ENERG. MEIO RURAL. Anais...2000. 7p.

MORAES-DUZAT, R. ;MACEDO, H.; ROCHA, L. C.; NASCIMENTO, R. C.; BARBOSA, A. P. **Secador solar multiuso para beneficiamento de produtos Naturais da Amazônia**. In: IV Encontro de Energia no Meio Rural (AGRENER 2002) Campinas: Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE/UNICAMP), 2002.

MOREIRA, C. A. M. **Avaliação do desempenho hidro-energético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água**. 129 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho/ Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, 2009.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. Ministério da Educação e do Desporto. Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. 4ª edição. 2014. 175p.

MUÑIZ, G.I.B. **Anatomia da madeira de espécies arbóreas da floresta estacional semidecidual de misiones**. Argentina: Curso de pós-graduação, Universidade federal do Paraná, 1993.

NAGAOKA, A. K.; SAMPAIO, C. A. P.; BOFF, C. E.; ARALDI, A. A. R. **Desenvolvimento de um coletor solar utilizando reciclagem de lâmpadas fluorescentes development of a solar collector using recycled fluorescent lamps**. Lajes, v.4, n.2, 2005. p. 120-125.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 21f. Monografia (Pós-Graduação *Lato-Sensu* em Fontes alternativas) - Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, MINAS GERAIS-BRASIL, Lavras, 2004.

NEVES, J. C. M. **Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo na cidade de Cascavel-PR**. Cascavel: UNIOESTE, 2012. 41 p.

NIEDZIALKOSKI, R. K. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. Cascavel: UNIOESTE, 2013. 57p.

NOCK, H. P.; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologias Rurais, Universidade Federal do Paraná, 1975. 216 p.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 429f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, v. 1, 1997.

OLIVEIRA, L.; SKAAR, C.; WENGERT, E. **Solar and air lumber drying during winter in Virginia**. Forest Products Journal, v. 32, n. 12, 1982. p. 37-44.

OLIVEIRA, J. T. S. **Problemas e Oportunidades com a Utilização da Madeira de Eucalipto**. WORKSHOP: Técnicas de Abate, Processamento e Utilização da Madeira de Eucalipto. Viçosa-MG, 22 a 24 de junho de 1999. p. 39-52.

ONO, A.; VENTURINO, A. **Secador solar para maderas: condiciones operativas**. Nota Técnica n5. 6p. Montevideo: LATU – Departamento de Proyectos Forestales, 2006.

ONO, A. **Secador solar de *Eucalyptus camaldulensis* de 40mm de espesor: condiciones operativas**. Nota Técnica n7. 10p. Montevideo: LATU – Departamento de Proyectos Forestales, 2006.

ONO, A.; VENTURINO, A.; CARDENAS, R.; CASTRO, P. **Secado solar en invierno de *Eucalyptus grandis*. Estudio comparativo entre dos sitios ubicados al norte y al sur**: condiciones operativas. Nota Técnica n11. 14p. Montevideo: LATU – Departamento de Proyectos Forestales, 2006.

PECK, E.C. Drying 4/4 red oak by solar heat. **Forest Products Journal**, v. 12, n. 3, 1962. p.103-107.

PENEREIRO, J. C.; MELO, L. P.; CORADI, T. B. **Construção de um aquecedor solar de baixo custo sem cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios**. Revista de Ciência & Tecnologia, v.10, n.1, 2010. p.18-34.

PENEREIRO, J. C.; FERREIRA, D. H. L.; SILVA, L. L.; MESCHIATTI, M. C.; **Medida das eficiências térmicas de aquecedores solares: uma proposta de envolver conteúdos de física básica e moderna para alunos das engenharias**. 10f.

Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas, 2011.

PEREIRA, P. T. S. **Energia Solar Térmica: Perspectivas do Presente e do Futuro**. 115f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

PEREIRA JUNIOR, L. C. **A interação entre geradores solares fotovoltaicos e veículos elétricos conectados à rede elétrica pública**. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PLUMPTRE, R.A. The design and operation of a small solar seasoning kiln on the Equator in Uganda. **Commonwealth Forestry Review**, v. 46, n. 4, 1967. p. 298-309.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Secagem da madeira**. Instituto de Pesquisa Tecnológica. Brasília: STI/IPT, 1985. 72p. (Série documentos, 22).

PORTAL SOLAR. Simulador de custo de sistema de energia solar fotovoltaica. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>>. Acesso em 02/08/2015.

**Indústria brasileira de árvores (IBÁ)**. Studio 113, 2015. Disponível em: <[http://www.iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf)>. Acesso em 03/08/2015.

PRATT, G.H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment, 1986. 122p.

PRATT, G. H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment/Building Research Establishment, 1974. 152p.

PROENÇA, E. D. R. B. **A energia solar fotovoltaica em Portugal: Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento**. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial), 2007.

RASMUSSEN, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Madison: USDA, Forest Service, 1961. 197p.

READ, W.R.; CHODA, A.; COPPER, P.I. A solar timber kiln. **Solar Energy**, v. 15, 1974. p. 309-316.

RIZZINI, C. T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil – manual de dendrologia brasileira**. São Paulo: Edgard Blücher, 2a Ed, 1978. 304p.

ROCHA, M. P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden Como Fontes de Matéria-Prima Para Serrarias.** 186f. Tese (Tese de Dr) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ROCHA, M. P.; TRUGILHO P. F. Qualidade da Madeira Serrada de *E. dunnii* em Função do Desdobro e da Condição de Umidade. **Revista Cerne**, Lavras, V. 12,n 4, 2006. p 314-321.

ROCHA, M. P.; TOMASELLI, I. **Efeito do modelo de desdobro na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.** Cerne, Lavras, v. 8, n. 2, 2002. p. 70-83.

RODERJAN, C. V. **O gênero *Eucalyptus* L'Herit (1788) – Myrtaceae. Notas de aula.** Curitiba: Departamento de Silvicultura e Manejo – Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, 1999.

RODRIGUEZ, L. E. S.; CARDENA, M. A. C.; AHUMADA, I.G. Diseno y operacion de uma estufa solar para secar mader. **Ingeniería Revista Académica**, v. 7, n. 3, 2003. p. 35-48.

ROSEN, H.N. **High - Temperature Initial Drying of Wood:** Potencial for Energy Recovery. For. Prod. J. .30(1 ) : 29-34. 1980.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional.** 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SALAMON, M.; MCLNTYRE, S. **Manipulation of Air Velocity Permits Drying Time Savings.** Canadian Forest Industries, v, 89, n .9, 1969. p. 49-57.

SANTINI, E.J. **Secagem de madeira serrada em estufa solar e sua comparação com os métodos convencionais.** 185f. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Parana, Curitiba, 1981.

SANTINI, E.J. **Influência de temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantios de rápido crescimento.** Curitiba: FUPEF, 1980. 15p. (Serie Tecnica, n.5).

SANTINI, E.J. **Metodos de secagem de madeira.** In: I SEMINARIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1., 1992, Santa Maria. Anais... Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. p. 47-59.

SANTOS, I.S. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus* sp. para produção de pisos a partir de toras de pequenos diametros.** 66p. Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SANTOS, G.R.V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden)**. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

SANTOS, G. R. V.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, 2003. p. 214-220.

SATTAR, M.A. **Comparative studies of wood seasoning with a special reference to solar drying**. Bano Biggyan Patrica, v. 16, n. 1/2, 1987. p. 30-42.

SEVERO, E. T. D. **Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus Elliptii***. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

SEVERO, E. T. D. **Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii***. Santa Maria: Ciencia Florestal, v.10, n.1, 2000. p.109-124.

SHOTTAFFER, J.E. e SHULER, C.E. **Estimating heat consumption in kiln drying lumber**. Technical Bulletin 73. University of Maine, Orono, 1974. 24p.

SIAU, J. F. **Transport process in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.

SILVA, J.C. **Estufa Solar: Uma Opção para Secagem de Madeira**. Revista da Madeira, v.1, 2000. p. 42-46.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JUNIOR, S.; MATOS, J. L. M. **Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* hill ex. maiden**. REVISTA FLORESTA 34 (1) Jan/Abr 2004, Curitiba. p. 13- 22.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274 p.

SIMPSON, W.T. **Drying Wood: A Review**. Forest Products Laboratory. USDA Forest Service. Madison: WI 53705, 1984. 34p.

SIMPSON, W.T. **Equilibrium moisture content prediction for wood**. Forest Products Journal, v. 21, n. 5, 1971. p. 48-49.

SIQUEIRA, D. A. **Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo**. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

SKAAR, C. **Wood-water relation**. New York: Spring-Verlag. 1988. 283p.

SKAAR, C. **Water in wood**. New York: Syracuse University Press, 1972. 218p.

SOUZA, J. T.; LIMA, E.; SILVA, G. L.; BALDIN, T.; MENEZES, W. M. **Avaliação da secagem em estufa solar de madeiras de *Eucalyptus dunnii* Maiden e *Pinus elliottii* Engelm.** In: ENCICLOPÉDIA Biosfera. Goiania: Centro científico Conhecer, 2015. v.11, n.21.

STAMM, J. A. **Wood and cellulose science**. New York: The Ronald Press, 1964. 549p.

STANGERLIN, D. M. **Avaliação do uso de estufa solar para secagem de madeira serrada de eucalipto**. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

STEINMAN, D. E.; VERMAAS, H. F.; FORRER, J. B. Solar timber drying kilns: Part I: Review of previous system and control measures and description of an automated solar kiln. **Journal of the Institute and Wood Science**, v.48, 1980. p.254-257.

SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TEIXEIRA, A. A.; CARVALHO, M. C.; LEITE, L. H. M. **Análise de viabilidade para a implantação do Sistema de energia solar residencial**. Belo Horizonte: Editora UniBH, v. 4, n. 3, 2011. p. 117-136.

TIEPOLO, G. M. **A energia solar e o poder fotovoltaico do estado do Parana**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica. Curitiba: DAELT, 2015.

TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem de madeira de *Pinus elliottii* Engelm. acima de 100°C**. 128 f. Tese (Livre Docência em Engenharia e Tecnologia Rurais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

TOMASELLI, I. **The influence of high-temperature drying on some Physical and Mechanical Properties of *Pinus radiata***. 284f. Tese (Tese de Doutorado) - University of Melbourne Faculty of Agriculture and Forestry, D. Don. Melbourne, 1977.

TROXELL, H.E.; MULLER, L.A. **Solar lumber drying in the Central Rocky Mountain Region**. Forest Products Journal, v. 18, n. 1, 1968. p. 19-24.

TROXELL, H. E. **Solar lumber drying in Colorado. Proceedings...** In: 15th Annual Meeting of the West Coast Dry Kiln Clubs. Portland: 1963. p.61-66.

TSCHERNITZ, J.L.; SIMPSON, W.T. Solar-heated forced-air, lumber dryer for tropical latitudes. **Solar Energy**, v. 22, 1979. p. 563-566.

URBANETZ JUNIOR, J. **Introdução a energia solar fotovoltaica e o sfvcr do escritório verde da UTFPR**. 56f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR Instituto de Engenharia do Paraná, IEP, Curitiba, 2014.

VERMAAS, H.F. **Drying of eucalypts for quality**: material characteristics, pre-drying treatments, drying methods, schedules and optimization of drying quality. In: SEMINARIO INTERNACIONAL DE UTILIZACAO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, Sao Paulo, 1995, Anais... Piracicaba: IPEF, 1995. p. 119-132.

VERMAAS, H.F. **Drying of eucalypts with special reference to young, fat-grown plantation material**. In: SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SOLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA E ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZACAO DA MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., Belo Horizonte, 1998. Anais... Vicosa: SIF/UFV, 1998, p. 106-118.

VIEHBECK, P. **Lo básico del secado de madera con energía solar**. Eschborn: Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologien – GATE, 1999. 49 p.

VILLIERE, A. **Séchage des Bois**. Ed. Dunod, Paris, 1966. 410p.

VITAL, B. R. **Utilizacao de energia solar para secagem de madeira**. Revista Ceres, v. 23, n.125, 1976. p. 1-10.

WASSIPPAUL, F. **Holztechnologie**: Vorlesungsmitschrift. Univ. Fur. Bodenkultur. Wien, 1977.

WAUGH, G. **Sawing of Young, Fast-Grow Eucalypts**. In: 1o Seminário Internacional sobre produtos Sólidos de Madeira de Alta Tecnologia e 1o Encontro sobre Tecnologias Apropriadas de Desdobro, Secagem e utilização da Madeira de Eucalipto. Belo Horizonte, 7 a 11 de dezembro de 1998. p. 69-81.

WENGERT, E.M. **The application of solar energy to air drying**. In: Practical Application os Solar Energy to Wood Processing. Blacksburg, For. Prod. Res. Soc., 1977. p. 33-4.

WENGERT, E. M.; DENIG, J. Lumber drying: today and tomorrow. **Forest Products Journal**. Madson, v. 45, n. 5, 1995. p. 22 – 30.

YANG, K.C. Solar kiln perfomance at a high latitude. **Forest Products Journal**, v. 30, n. 3, 1980. p. 37-40.

## APENDICES

FIGURA 23 - ETAPA DE CONSTRUÇÃO DA ESTUFA: FUNDAÇÃO.....	103
FIGURA 24 - ETAPA DE CONSTRUÇÃO DA ESTUFA: ASSOALHO E ISOLAMENTO COM ISOPOR.....	103
FIGURA 25 - ETAPA DE CONSTRUÇÃO DA ESTUFA: ESTRUTURA E COLETOR SOLAR.....	104
FIGURA 26 - VENTILADOR E CONFIGURAÇÃO PROJETADA DA PILHA.....	104
FIGURA 27 - <i>DUMPERS</i> .....	105
FIGURA 28 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO.....	105
FIGURA 29 - <i>DATA LOGGER HOBO</i> .....	106
FIGURA 30 - CONFIGURAÇÃO DA PILHA DE MADEIRA NA ESTUFA CONVENCIONAL NA SECAGEM DE <i>Eucalyptus</i> <i>spp</i> .....	106
TABELA 18 - ANOVA PARA O TEOR DE UMIDADE INICIAL PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus spp.</i> EM FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE SECAGEM.....	107
TABELA 19 - ANOVA PARA O TEOR DE UMIDADE FINAL PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus spp.</i> EM FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE SECAGEM.....	107
TABELA 20 - ANOVA PARA TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR.....	107
TABELA 21 - ANOVA PARA UMIDADE RELATIVA DO AR INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR.....	107
TABELA 22 - ANOVA PARA UMIDADE DE EQUILÍBRIO INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR.....	108
TABELA 23 - ANOVA PARA O GRADIENTE DE UMIDADE.....	108
TABELA 24 - ANOVA PARA A CONTRAÇÃO.....	108
TABELA 25 - ANOVA PARA O ARQUEAMENTO.....	108



TABELA 26 - ANOVA PARA O ENCURVAMENTO..... 109

TABELA 27 - ANOVA PARA O ENCANOAMENTO..... 109

FIGURA 23 – ETAPA DE CONSTRUÇÃO DA ESTUFA: FUNDAÇÃO



FONTE: O autor (2016)

FIGURA 24 – ETAPA DE CONSTRUÇÃO DA ESTUFA: ASSOALHO E ISOLAMENTO COM ISOPOR



FONTE: O autor (2016)

FIGURA 25 – ETAPA DE CONSTRUÇÃO DA ESTUFA: ESTRUTURA E COLETOR SOLAR



FONTE: O autor (2016)

FIGURA 26 – VENTILADOR E CONFIGURAÇÃO PROJETADA DA PILHA



FONTE: O autor (2016)

FIGURA 27 – DUMPERS



FONTE: O autor (2016)

FIGURA 30 – INVERSOR DE FREQUÊNCIA DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO



FONTE: O autor (2016)



FIGURA 31 – DATA LOGGER HOBO



FONTE: O autor (2016)

FIGURA 32 – CONFIGURAÇÃO DA PILHA DE MADEIRA NA ESTUFA CONVENCIONAL NA SECAGEM DE *Eucalyptus* spp.

FONTE: O autor (2016)

TABELA 18 – ANOVA PARA O TEOR DE UMIDADE INICIAL PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp. EM FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE SECAGEM

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	4580,23	1	2290,12	4,48	0,014*
Dentro dos tratamentos	44480,09	87	511,265		
Total	49060,30	89			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 19 – ANOVA PARA O TEOR DE UMIDADE FINAL PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp. EM FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE SECAGEM

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	41,41	1	20,71	7,65	0,01*
Dentro dos tratamentos	235,44	87	2,71		
Total	276,85	89			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 20 – ANOVA PARA TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	883,58	1	883,57	75,44	0,000*
Dentro dos tratamentos	562,19	48	11,71		
Total	1445,77	49			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 21 – ANOVA PARA UMIDADE RELATIVA DO AR INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	5877,96	1	5877,96	60,00	0,000*
Dentro dos tratamentos	4702,16	48	97,96		
Total	10580,12	49			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 22 – ANOVA PARA UMIDADE DE EQUILÍBRIO INTERNA E EXTERNA A ESTUFA SOLAR

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	398,03	1	398,03	84,104	0,000*
Dentro dos tratamentos	227,16	48	4,73		
Total	625,19	49			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 23 – ANOVA PARA O GRADIENTE DE UMIDADE

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	3083,73	1	1027,91	41,97	0,000*
Dentro dos tratamentos	2645,09	108	24,49		
Total	5728,83	11			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 24 – ANOVA PARA A CONTRAÇÃO

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	9,61	1	4,80	1,32	0,272**
Dentro dos tratamentos	319,62	88	3,63		
Total	329,22	90			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 25 – ANOVA PARA O ARQUEAMENTO

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	23,07	1	7,69	2,49	0,064**
Dentro dos tratamentos	330,34	107	3,09		
Total	353,41	110			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 26 – ANOVA PARA O ENCURVAMENTO

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	2,98	1	0,994	0,465	0,707
Dentro dos tratamentos	231,04	108	2,14		
Total	234,02	111			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.

TABELA 27 – ANOVA PARA O ENCANOAMENTO

FV	SQ	GL	QM	F-cal.	P
Entre grupos	30,81	1	10,27	5,19	0,002**
Dentro dos tratamentos	213,75	108	1,98		
Total	244,55	111			

Nota: FV: Fonte de variação; SQ: Soma dos quadrados; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; F-cal: F calculado; P: Probabilidade de erro; \*: significativo ao nível de 5% de erro; \*\*: não significativo ao nível de 5% de erro.